



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

NIKO LIIMATAINEN

KOILLIS-SATAKUNNAN SÄHKÖ OY:N SÄHKÖVERKON SUOJAUKSEN NYKYTILANTEEN TARKASTELU

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta

Diplomityö ja tarkastaja hyväksytty konsistorin kokouksessa

7.2.2018

TIIVISTELMÄ

LIIMATAINEN, NIKO: Koillis Satakunnan Sähkö Oy:n sähköverkon suojauksen nykytilanteen tarkastelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 50 sivua, 6 liitesivua

Helmikuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta

Avainsanat: oikosulku, maasulku, suojarele, verkonsuojaus, nykytilanne, keskijänniteverkko

Turvallisen ja jatkuvan sähköjakelun kannalta on hyvin tärkeää, että sähköverkkojen suojaus toimii selektiivisesti, riittävän nopeasti ja luotettavasti. Pitkittyneet vikatilanteet saattavat vikatilanteesta riippuen aiheuttaa verkossa hyvin suuria virtoja ja kosketusjännitteitä, joiden seurauksena voi esiintyä pidempiä keskeytyksiä sähkönjakelussa, suuria rakenteellisia vikoja tai jopa hengenvaarallisia tilanteita. Relesuojauksen tehtävänä on eristää verkossa esiintyvät viat sekä vian aiheuttamat haitat mahdollisimman pienille alueille. Tämän vuoksi on tärkeää, että verkkoon asennetuilla suojalaitteilla on oikeat asetteluarvot ja ne toimivat selektiivisesti.

Tarkastelun kohteena oli Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n keskijänniteverkko ja siihen kuuluvat yhdeksän sähköasemaa. Tarkoituksena oli tehdä pistokoe-tyyppinen oikosulku- ja maasulkusuojaustarkastelu kahdelle sähköasemalle ja verrata saatuja tuloksia käytöntukijärjestelmästä saatuihin arvoihin. Tämän jälkeen tarkasteltiin koko verkkoa käytöntukijärjestelmän avulla ja etsittiin mahdollisia ongelmakohtia verkon suojauksen toimivuudessa.

Kahdelle verkon sähköasemalle tehtiin hyvin tarkka oikosulku- ja maasulkulaskenta käsin. Laskentatuloksista huomattiin, että käytöntukijärjestelmä DMS600:sta löytyvät vikaparametrit vastasivat hyvin todellisuutta ja näin ollen relesuojaus oli tarkastelluilla asemilla toimiva. Tarkasteltaessa verkkoa kokonaisuutena havaittiin, että Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n verkon suojaus toimii nykyisellään hyvin. Koko verkon tarkastelussa löytyi muutamia verkon kohtia, jotka Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n tulisi selvittää. Samalla verkosta löytyi muutama kohta, joihin saatetaan tarvita investointeja lähitulevaisuudessa.

ABSTRACT

LIIMATAINEN NIKO: Analysis of the present situation of network protection in Koillis-Satakunnan Sähkö Oy

Tampere university of technology

Master of Science Thesis, 50 pages, 6 Appendix pages

February 2018

Master's Degree Programme in Electrical engineering

Major: Powersystems and electricity markets

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: Short circuit fault, earth fault circuit, grid protection relay, network protection, distribution network

To achieve safe and continuous electricity distribution, the protection of the grid must work selectively, swiftly and reliably. Long lasting faults in grid, depending on the type of the fault, might cause large currents and voltages that can lead to long interruptions, structural damages or even life -threatening situations. Relay protection systems are installed in grids to observe these faults, prevent the damages they cause and limit the interruptions to as small areas as possible. Because of all these reasons it is important that the protections systems in the grid have correct parameters and that they work selectively.

In this thesis the focus is in Koillis-Satakunnan Sähkö Oy's grid and the nine distribution stations that are included in their grid. The purpose of this document was to conduct a full analysis of short-circuit and earth faults protection for two of company's main primary stations. After the analysis the results were compared to distribution management systems (DMS). The third part of the survey was to analyze the whole grid and search vulnerabilities using the survey program mentioned earlier.

Two of the main primary stations were selected for very precise manual analysis on their short circuit and earth fault parameters. The calculations matched those in DMS600 very well, which indicates that the relay protection works as wanted. When conducting the analysis for the whole grid, the observation was that the relay protection works as it should in current grid but the same analysis also confirmed that there might be a need for some investments in near future

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:lle. Työn tarkoituksena on selvittää yhtiön omistaman sähköverkon suojauksen nykytilanne ja tarkastella käytöntukijärjestelmän laskemien vikavirtojen arvojen oikeellisuutta.

Työn tarkastajana toimi professori Pertti Järventausta, joka ansaitsee suuret kiitokset hyvästä työn ohjaamisesta. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n puolelta haluan kiittää Juha Koivulaa hyvästä työn ohjauksesta yrityksen suunalta, sekä Timo Renttoa, joka mahdollisti työn toteuttamisen etänä.

Jyväskylässä 1.12.2017

Niko-Petteri Liimatainen

Sisälllys

TIIVISTELMÄ.....	i
ABSTRACT	ii
ALKUSANAT	iii
LYHENTEET JA MERKINNÄT	vi
1. JOHDANTO.....	1
2. SÄHKÖVERKON OIKO- JA MAASULKU	2
2.1 Oikosulku	2
2.1.1 Kolmivaiheinen oikosulku	2
2.1.2 Kaksivaiheinen oikosulku	3
2.1.3 Kaksivaiheinen oikosulku maasululla.....	5
2.1.4 Oikosulkuvirta.....	6
2.1.5 Tasa- ja vaihtovirtakomponentti	7
2.2 Verkon suojaus oikosulkusuureet	9
2.2.1 Alkuoikosulkuvirta.....	9
2.2.2 Pysyvän tilan oikosulkuvirta	10
2.2.3 Sysäysoikosulkuvirta	11
2.2.4 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta	11
2.3 Maasulku	11
2.3.1 Maasta erotetun verkon maasulkuvirta	13
2.3.2 Sammutetun verkon maasulku	17
2.3.3 Maadoitus- ja kosketusjännite.....	18
2.3.4 Katkeilevat maasulut	22
3. VIKAVIRTOJEN LASKENTAMENETELMÄT	23
3.1 Haasteet	23
3.2 Theveninin menetelmä	23
3.3 Ominaisoikosulkuteho.....	25
4. JAKELUVERKON SUOJAUS.....	27
4.1 Suojauksen tavoitteet ja suojaukselle asetettavat vaatimukset.....	27
4.1.1 Sähkösematarkastukset	28

4.1.2	Suojareleiden tarkastukset.....	28
4.2	Reletyypit	28
4.2.1	Ylivirtasuojaus	30
4.2.2	Maasulkusuojaus	31
4.2.3	Taajuusrele	33
4.2.4	Differentiaalisuojaus	33
4.2.5	Distanssirele	34
4.2.6	Kiskosuojaus	37
4.3	JAKELUVERKON SUOJAUKSEN SUUNNITTELU	38
4.3.1	Oikosulkusuojauksen suunnittelu	38
4.3.2	Maasulkusuojauksen suunnittelu	39
5.	KOILLIS-SATAKUNNAN SÄHKÖVERKON SUOJAUSTARKASTELU	40
5.1	Verkon rakenne	40
5.2	Käytöntukijärjestelmä DMS600	41
5.3	Sähköaseman oiko- ja maasulkutarkastelu	41
5.4	Verkon nykytila	48
	LÄHTEET	52
	LIITE 1: VERKON HAVAHTUVAISUUS	55
	LIITE 2: VERKON OIKOSULKUKESTOISUUS TILA 2	56
	LIITE 3: VERKON OIKOSULKUKESTOISUUS TILA 2	57
	LIITE 4: MAASULKUSUOJAUS TARKASTELTAVA TILA 1	58
	LIITE 5: MAASULKUSUOJAUS TARKASTELTAVA TILA 2	59
	LIITE 6: VERKON KUORMITUSASTE	60

LYHENTEET JA MERKINNÄT

\underline{I}_{k3}	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta
\underline{I}_{k2}	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta
\underline{I}_{k2E}	Kaksivaiheinen maaosulkuvirta
\underline{I}_k''	Alkuoikosulkuvirta
I_k	Pysyvän tilan oikosulkuvirta
I_s	Sysäysoikosulkuvirta
I_b	Katkaisuhetken oikosulkuvirta
\underline{I}_k'	Muutostilan oikosulkuvirta
I_{th}	Terminen oikosulkuvirta
U_m	Maasulkujännite
\hat{u}	Jännitteen huippuarvo
z_k	Oikosulkupiirin vaiheimpedanssi
φ_k	Impedanssin vaihekulma
τ	Piirin aikavakio
α	Jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä
R_k	Oikosulkuresistanssi
X_k	Oikosulkureaktanssi
\underline{U}_v	Vikapaikan vaihejännite ennen vikaa
\underline{Z}_f	Vikaimpedanssi
\underline{Z}_i	Syöttävän verkon Theveninin impedanssi.
R_f	Vikaresistanssi
C	Maakapasitanssi
I_f	Vikavirta maasulussa
R_m	Maadoitusresistanssi
S_k	Ominaisoikosulkuteho
$S_1 \dots S_n$	Komponenttien ominaisoikosulkutehot
S_k	Ominaisoikosulkuteho
U_n	Verkon komponentin nimellispääjännite ennen vikaa
Z_k	Komponentin oikosulkuimpedanssi vaihetta kohden
S_n	Komponentin nimellisteho
z_k	Oikosulkuimpedanssin suhteellisarvo (tahtikoneen tapauksessa voidaan käyttää koneen tahtireaktanssin suhteellisarvoa)
c	Jännitekerroin, jolla kompensoidaan verkossa esiintyvien muutoksien aikaansaamia eroja nimellisjännitteen ja verkon sähkömotoristen voimien välillä (arvot taulukossa 3.1)
U_n	Verkon nimellisjännite

R_k	Verkon komponenttien yhteenlaskettu oikosulkuresistanssi
X_k	Verkon komponenttien yhteenlaskettu oikosulkureaktanssi
Z_k	Verkon oikosulkuimpedanssi
\underline{Z}_1	Verkon myötäimpedanssi
\underline{Z}_2	Verkon vastaimpedanssi
\underline{Z}_0	Verkon nollaimpedanssi
U_{TP}	Ihmisen kosketeltavissa oleva jännite maasulun aikana

1. JOHDANTO

Suomessa sähköverkon luotettava ja turvallinen toiminta on todella tärkeä ja tarkoin valvottu asia. Relesuojauksen on toimittava oikein, jotta voidaan välttää hengenvaaralliset tilanteet sekä taata jatkuva ja tasainen sähkönjakelu. Verkon toiminnan kannalta on siis tärkeää suunnitella verkonsuojaus oikein noudattamalla sille asetettuja standardeja ja lakeja.

Suojaus saadaan toimimaan halutulla tavalla tarkastelemalla verkon vikoja ja laske-
malla sille ominaisia parametrejä hyvin tarkasti. Näistä parametreistä voidaan puolestaan muodostaa vikatilanteiden raja-arvot, joihin suojauksen toiminta perustuu. Tässä työssä tarkastellaan jakeluverkon suojauksen toimintaa ja suunnittelua sekä perehdytään tarkemmin jo olemassa olevaan jakeluverkkoon.

Ensiksi työssä käydään läpi oikosulkujen ja maasulkujen teoriaa ja niihin liittyvää vikavirtojen laskentaa keskijänniteverkossa. Työn painopiste on, Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n keskijänniteverkossa (KSAT:n). Vikoihin liittyvän teorian lisäksi työssä käydään läpi myös vikojen tunnistamisen ja verkon suojauksen teoriaa. Suojaukseen liittyviä releitä on montaa eri tyyppiä, ja työssä esitellään niiden toimintaperiaatteita ja käyttötarkoituksia.

Seuraavaksi diplomityössä tarkastellaan KSAT:n sähköverkon suojauksen nykytilan-
netta. Työn aikana tehtiin myös kahdelle sähköasemalle pistokoe-tyyppisesti oikosulku- ja maasulkusuojauksen tarkistuslaskelmat käsin. Sähköasemat on valittu niin, että niitä syötetään eri jännitetasoilla. Näin saadaan samalla vertailukohta käytöntukijärjestelmän arvoille, kun aseman syöttöjännite on eri. Yhtiön verkko käsittää yhteensä 190 km 110 kV:n, 1300 km 20 kV:n ja 2000 km 0,4 kV:n verkkoa sekä yhdeksän sähköasemaa. Tarkasteltavalla alueella ei ole merkittävästi hajautettua sähköntuotantoa, joten niitä ei huomioida tarkastelussa.

Lopuksi diplomityö painottuu ABB DMS 600 ohjelmiston avulla tehtävään tarkasteluun verkon suojauksen oikeasta toiminnasta ja asetteluarvolaskennasta. Verkkoa tarkastellaan käytöntukijärjestelmässä havahtuvaisuuden, kestoisuuden, maasulkusuojauksen ja kuormituksen näkökulmasta. Tarkastelussa kiinnitetään erityistä huomioita käytöntukijärjestelmässä näkyviin ongelmakohtiin verkossa tai kohtiin, jotka saattavat muodostua ongelmaksi lähitulevaisuudessa. Näissä verkon osissa pyritään selvittämään ongelman syy käytöntukijärjestelmästä ja käsin laskien.

2. SÄHKÖVERKON OIKO- JA MAASULKU

Sähköverkossa voi tapahtua useita erityyppisiä häiriöitä, jotka johtavat erilaisiin vika-tilanteisiin ja vikavirtoihin. Viat voivat olla hengenvaarallisia ja aiheuttaa pitkiäkin keskeytyksiä. Sähköverkkoyhtiöt pyrkivät mahdollisimman hyvin ennaltaehkäisemään häiriöiden syntymistä ja minimoimaan tapahtuvien häiriöiden vaikutusalueet. Tässä kappaleessa keskitytään oiko- ja maasulkuihin.

2.1 Oikosulku

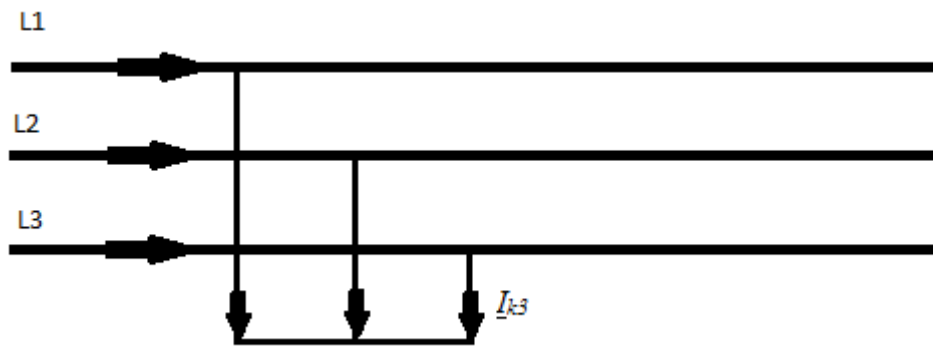
Oikosulku aiheutuu järjestelmän kahden tai useamman virtajohtimen välisestä eristysviasta, jossa jännitteinen osa kytkeytyy vahingossa tai tarkoituksellisesti toiseen jännitteeseen osaan. Tämä voi tapahtua joko pienen resistanssin tai impedanssin kautta. Pääasiassa oikosulkuja tapahtuu joko pääeristyksen heikentymisen, ylijännitteiden, virheellisten kytkentöjen tai ulkoisten tekijöiden, kuten puiden kaatumisen vuoksi. Sähköverkossa komponenttien eristyksen toteutus vaihtelee ilmastosta kiinteään eristykseen ja näiden yhdistelmiin. Eristyksen heikentymiselle on monia syitä kuten ikääntyminen tai likaantuminen, mitkä lisäävät eristyksen vuotovirtoja. (INSKO, 1973)

Yksivaiheinen oikosulku tarkoittaa yhden äärijohtimen ja nollajohtimen välillä tapahtuvaa eristysvikaa, kun taas monivaiheinen oikosulku käsittää nimensä mukaisesti useamman äärijohtimen. Kolmivaiheisessa verkossa voi tapahtua symmetrisiä tai epäsymmetrisiä oikosulkuja. (Partanen & Lakervi, 2012)

Oikosulkusuojausta määritettäessä on kyettävä ratkaisemaan oikosulkuvirran suuruus virtapiiriin jokaisessa pisteessä, ja sen suurin sallittu kesto aika. Oikosulkuvirran suuruuden laskennalliseen määrittämiseen tarvitaan tietoja käsiteltävästä verkosta. Samaa laskentamallia ei voida soveltaa säteittäiselle ja silmukoidulle verkolle. (Partanen & Lakervi, 2012)

2.1.1 Kolmivaiheinen oikosulku

Kuvassa 2.1 on esitetty kolmivaiheinen oikosulku. Se voidaan määritellä viaksi, jossa kaikki kolme vaihetta ovat kytkeytyneenä yhteen. Vika saa verkon vaiheiden jännitteen putoamaan vikapaikassa lähelle nollaa ja virta nousee vastaamaan kolmivaiheista oikosulkuvirtaa I_{k3} . Kuvassa 2.1 näkyvä I_{k3} on tapahtuvan kolmivaiheisen oikosulun oikosulkuvirta, joka on sama kaikissa vaiheissa L1, L2 ja L3. (INSKO, 1973) (IEC, 1988)



Kuva 2.1. Kolmivaiheinen oikosulku (IEC, 1988)

Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika, jossa jokainen vaihe syöttää vikapaikkaa. Kolmivaiheisesta oikosulusta syntyy verkon suurin mahdollinen oikosulkuvirta kyseisessä pisteessä ja sen laskennallista arvoa käytetään usein suojaustarkasteleissa. Kolmivaiheisen oikosulun symmetrinen luonne tekee sen laskennasta suhteellisen helppoa verrattuna epäsymmetrisiin tapauksiin. Laskennassa voidaan käyttää verkkokomponenttien myötäimpedansseja, jotka ovat niiden normaaleja oikosulkuimpedansseja. (IEC, 1988) (Ensto, 2016)

Kaavan 2.1 avulla voidaan laskea 3-vaiheinen oikosulkuvirta:

$$I_{k3} = \frac{c \underline{U}_v}{\underline{Z}_f + \underline{Z}_i} \quad (2.1)$$

missä

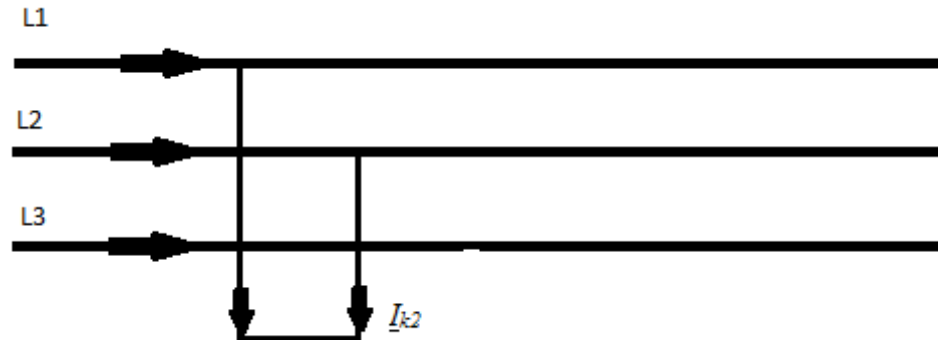
\underline{U}_v	on vikapaikan vaihejännite ennen vikaa
\underline{Z}_f	on vikaimpedanssi
\underline{Z}_i	on syöttävän verkon Theveninin impedanssi.
c	on jännitekerroin

Kolmivaiheista oikosulkuvirtaa tarvitaan verkon suojauksen mitoituksessa, koska sen arvo on yleensä suurin mahdollinen oikosulkuvirran arvo. Mitoitettaessa asetteluarvoja oikosulkusuojaukselle tulee releiden asettelut tehdä niin, että pikalaukaisu tapahtuu ennen kolmivaiheisen oikosulun vikavirran arvon saavuttamista. (IEC, 1988)

2.1.2 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheinen oikosulku on esitetty kuvassa 2.2 ja siitä syntyvä oikosulkuvirta on lähes poikkeuksetta pienempi kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta (Paavola, 1970).

Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika, jota laskettaessa tulee huomioida sekä myötä- että vastaimpedanssi. Kuitenkin muuntajilla, johdoilla, ei pyörivillä koneilla sekä epätahtikoneilla myötä- ja vastaimpedanssit ovat yhtä suuret, joten kaksivaiheinen oikosulku ei kasva kolmivaiheista oikosulkua suuremmaksi muualla kuin tahtikoneiden läheisyydessä. (Mörsky, 1993) (IEC, 1988)



Kuva 2.2. Kaksivaiheinen oikosulku (IEC, 1988)

Kuvassa kaksivaiheinen oikosulkuvirta on I_{k2} ja se voidaan esittää kaavalla 2.2 seuraavasti.

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} I_{k3} \quad (2.2)$$

missä

Z_1 oikosulkupiirin myötäimpedanssi

Z_2 oikosulkupiirin vastaimpedanssi

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan myös laskea kaavalla 2.1. Kaksivaiheisessa oikosulussa lopullinen vikavirran arvo lisäämällä kaavaan $\frac{\sqrt{3}}{2}$ -kerroin.

Kaavasta 2.2 voidaan huomata, että kaksivaiheinen oikosulkuvirta on suurempi kuin kolmivaiheinen kun $Z_2 < 0,73 * Z_1$. Tämä voi toteutua vain, jos impedanssien vaihekulmien poikkeama on alle 15 astetta. Käytännössä kaksivaiheinen oikosulkuvirta voi kasvaa kolmivaiheista suuremmaksi vain lähellä tahtikonetta, sillä muuntajien, johtojen ja epätahti- sekä ei-pyörivien koneiden myötä- ja vastaimpedanssit ovat yhtä suuret. Mutta tahtikoneenkin tapauksessa tulee ottaa huomioon, että kaksivaiheinen oikosulkuvirta vaatii aikaa kasvaakseen kolmivaiheista suuremmaksi ja yleensä rele ehtii reagoida vikaan ennen kuin kasvuun tarvittava aika on kulunut. (IEC, 1988) (INSKO, 1973)

Kaava 2.2 voidaan ilmaista myös toisessa muodossa kaavan 2.3 mukaisesti.

$$I_{k2} = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_1|} \quad (2.3)$$

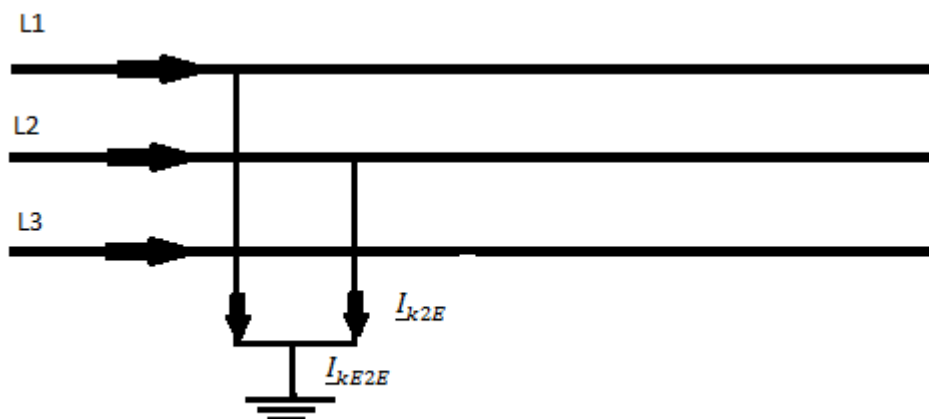
missä

\underline{Z}_1 verkon myötäimpedanssi
 \underline{Z}_2 verkon vastaimpedanssi

Kuten kaavasta 2.3 voidaan huomata, tulee kaksivaiheisen oikosulun laskennassa huomioida myös vastaverkon impedanssi, jotta tulos vastaisi todellisuutta. Kaavasta huomataan myös, että jos vikapaikkaan ei liity pyöriviä koneita, voidaan todeta myötä- ja vastaverkon impedanssit yhtä suuriksi ja näin kokonaisimpedanssi on kaksi kertaa laskettu myötäverkon impedanssi. (IEC, 1988)

2.1.3 Kaksivaiheinen oikosulku maasululla

Kaksivaiheisen oikosulun tapahtuessa saattaa sen yhteydessä esiintyä myös maasulku. Kuvassa 2.3 on esitetty piiri, jossa kaksivaiheisessa oikosulussa on tapahtunut myös maasulku. Vikatyypin liittyy kaksi alkuoikosulkuvirran arvoa, jotka ovat \underline{I}_{k2E} ja \underline{I}_{kE2E} . (IEC, 1988)



Kuva 2.3. Kaksivaiheinen oikosulku maasululla (IEC, 1988)

Maasulku kaksivaiheisessa oikosulussa saa yleensä aikaan sen, että vikavirran arvo pienenee. Tämä johtuu siitä, että vikavirran suuruuteen vaikuttaa vikapaikassa verkon impedanssin lisäksi myös mahdollinen vikaimpedanssi. (IEC, 1988)

Tavallinen maasulku saa viallisen vaiheen jännitteen putoamaan nolnaan, mikäli vika-paikassa ei ole vikaresistanssia. Nollajännitteen suuruus taas määräytyy siitä, vaikut-taako vika maan ja vaiheen välillä vai kahden vaiheen ja maan välillä. (Hänninen, 2001)

Kaksivaiheisen oikosulun kytkeytyessä lisäksi maahan, tulee laskuihin ottaa mukaan nollaverkko. Vikavirta kulkee kahdesta vaiheesta maahan, jolloin nollaverkko kuvaa maan kautta muodostuvaa vikavirtapiiriä. Kaavassa 2.4 on esitetty kaksivaiheisen oi-kosulun laskenta, kun sen yhteydessä tapahtuu myös maasulku. (IEC, 1988)

$$I_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0|} \quad (2.4)$$

missä

\underline{Z}_0 verkon nollaimpedanssi
 \underline{Z}_1 verkon myötäimpedanssi

2.1.4 Oikosulkuvirta

Oikosulkuvirta voidaan kuvata ajan t funktiona yhtälöllä

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (2.5)$$

missä

\hat{u} jännitteen huippuarvo
 z_k oikosulkupiirin vaiheimpedanssi
 φ_k impedanssin vaihekulma
 τ piirin aikavakio
 α jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä

Nämä komponentit voidaan määritellä seuraavasti vikavirtapiirin resistanssin R, reak-tanssin X sekä induktanssin L avulla

$$z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (2.6)$$

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{X_k}{R_k}\right) \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (2.8)$$

missä

R_k oikosulkuresistanssi

X_k oikosulkureaktanssi

Säteittäisen verkon tapauksessa oikosulkuvirran laskenta on huomattavasti helpompaa, sillä johto-osuus voidaan helposti esittää yksinkertaisemmassa muodossa. Säteilteisessä verkossa oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään tavallisesti Theveninin menetelmää, jossa johto-osuutta mallinnetaan sijaiskytkennällä. Theveninin menetelmässä tarvitaan vikavirran laskemiseen vikapaikan jännite sekä verkon impedanssi, joka on laskettavissa johto-osuuksien pituuden, johdintyyppien sekä syöttävän verkon oikosulkutehon kaavan 2.1 mukaisesti. Vian alussa vikavirran suuruus määräytyy jännitteen hetkellisarvon perusteella ja sen amplitudi on suurimmillaan alkamishetkellä. Vikavirta alkaa kuitenkin laskea nopeasti ja vakiintuu lopulta symmetriseen jatkuvan tilan arvoonsa. (Partanen & Lakervi, 2012) (Ensto, 2016) (IEC, 1988)

Jakeluverkkoa tarkasteltaessa tulee oikosulkuvirtalaskelmissa ottaa huomioon vikavirran suuruuden muutostilan- ja jatkuvan tilan arvot. Lyhyellä suojauksen toiminta-ajalla tulee tarkastella muutostilaa ja pidemmällä toiminta-ajoilla jatkuvan tilan arvoja. (IEC, 1988) (Elovaara, 1993)

Kun tarkastellaan verkon oikosulkusuojausta, on huomioitava oikosulusta aiheutuva johtojen lämpeneminen ja jälleenkytkentöjä seuraava jäähtyminen. Nämä tekijät voidaan huomioida laskemalla oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika t yhtälöstä: (IEC, 1988) (Ensto, 2016)

$$t = t_1 * e^{-\frac{t_0}{\tau}} + t_2 \quad (2.9)$$

missä

t_1 oikosulun kesto aika ennen aikajälleenkytkennän jännitteetöntä aikaa

t_0 on aikajälleenkytkennän jännitteetön aika

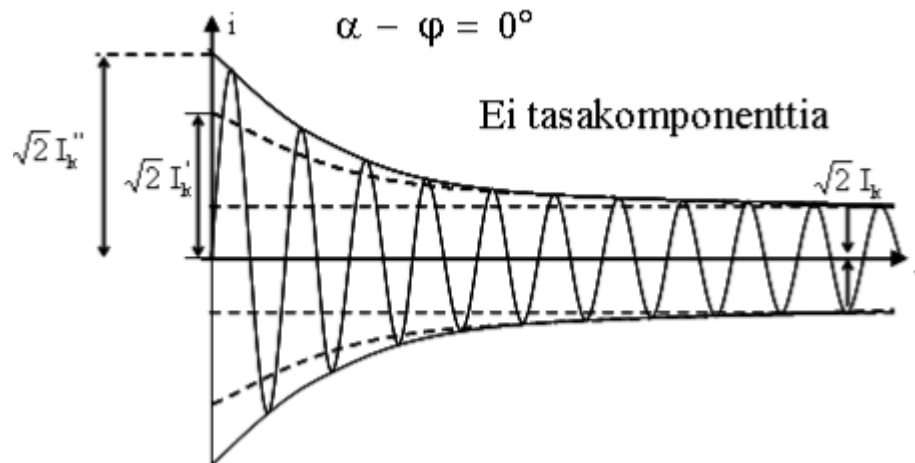
τ on johtimen jäähtymisvakio

t_2 on aikajälleenkytkennän jälkeinen oikosulun kesto

2.1.5 Tasa- ja vaihtovirtakomponentti

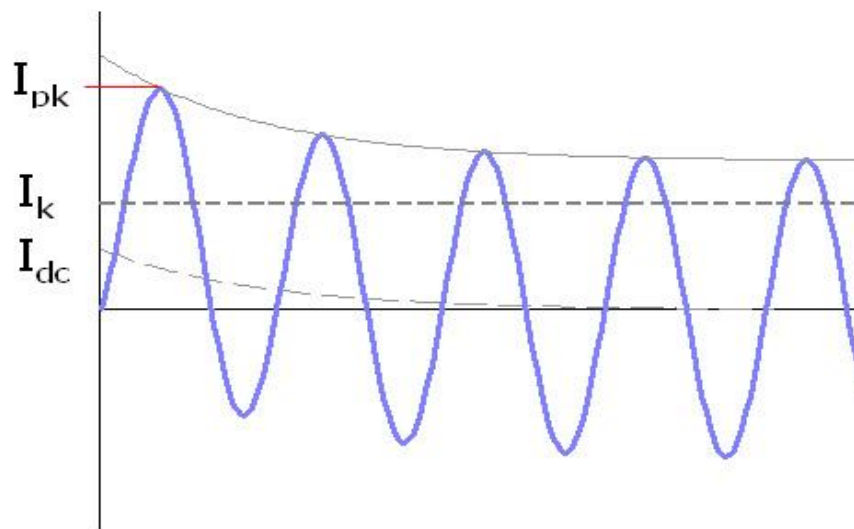
Oikosulkuvirran suuruus määräytyy hyvin paljon vian tapahtumishetken mukaan, sillä se, millä hetkellä verkko oikosulkeutuu, määrittää oikosulkuvirran tasa- ja vaihtovirtakomponentin esiintymisen. Jos jännitteen ja verkon impedanssien väliset vaihekulmat ovat yhtä suuret tai poikkeavat toisistaan 180 astetta ei tasavirtakomponenttia

esiinny lainkaan. Tässä tapauksessa vaihtovirtakomponentti määrittää vikavirran suuruuden ja verkon kokema vikavirta on symmetrinen kuten kuvasta 2.4 huomataan. (IEC, 1988)



Kuva 2.4. Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen ilman tasavirtakomponenttia (Salminen, 2008)

Kuvassa 2.4 nähdään, kuinka vikavirran amplitudi vaihtelee symmetrisesti nollatason mukaan. Vaihtovirtakomponentti vaimenee symmetrisesti pysyvään arvoonsa. Kuvassa 2.5 on esitetty oikosulkuvirran muutos, kun siihen vaikuttaa tasa- ja vaihtovirtakomponentti. Tämä tilanne tapahtuu oikosuljetaessa piiri millä tahansa muulla kuin aiemmin mainituilla vaihekulman erotuksilla. Tasavirtakomponentin vaikutus tekee vikavirrasta epäsymmetrisen ja vikavirran arvot saavat huippunsa, kun jännitteen ja verkon impedanssin vaihekulmien erotus on ± 90 astetta. (IEC, 1988)



Kuva 2.5. Oikosulkuvirran käyttäytyminen tasa- ja vaihtovirtakomponentilla (Ensto, 2016)

Vian tapahtumahetkellä tasavirtakomponentin alkuarvo on yhtä suuri kuin vaihtovirtakomponentin huippuarvo. Kuten kuvasta voidaan huomata, tapahtumahetken jälkeen

tasavirtakomponentti alkaa vaimeta eksponentiaalisesti vaaleamman katkoviivan mukaan ja asettuu lopulta arvoon nolla. Vaimeneminen on seurausta verkon resistanssista ja reaktanssista, joiden suhde määrää vaimenemisnopeuden. (Lakervi E., 1998)

Kummankin edellä mainitun komponentin vaimenemiseen liittyy monia tekijöitä, ja vikapaikkaa lähellä olevat tahtikoneet sekä muuttuva vikaimpedanssi tekevät ilmiöstä monimutkaisemman. Kuitenkin tämän työn kannalta ei ole mielekäästä keskittyä käsittelemään vaimenemista tämän tarkemmin.

2.2 Verkonsuojauksen oikosulkusuureet

Verkonsuojausta suunniteltaessa tulee muistaa, ettei oikosulkuvirta ole vain tasasuuruinen arvo, vaan vaihtelee voimakkaasti ajan funktiona vian tapahtumahetken jälkeen. Seuraavaksi käydään läpi oikosulkuvirran perussuureet ja niiden esiintymisajan kohta oikosulussa.

2.2.1 Alkuoikosulkuvirta

Alkuoikosulun merkki on I_k'' ja sen arvo on vian syntyhetkellä vaikuttavan vaihtovirtakomponentin tehollisarvo. Alkuoikosulkuvirran arvo on yleensä hyvin suuri hetkelisarvo verrattuna verkon normaaliin oikosulkuvirtaan ja sitä ei juuri käytetä verkon mitoituksessa, sillä sen huomioon ottaminen johtaisi verkon suureen ylimitoitukseen. (Lakervi E., 1998)

Alkuoikosulkuvirran suuruus riippuu sitä edeltävän verkon impedanssista ja verkossa olevista koneista. Verkon impedanssi määräytyy komponenttiensa impedanssista. Verkossa olevat tahti- ja epätahtikoneet syöttävät vikapaikkaan oikosulkuvirtaa, magneettikenttiin varastoituneesta energiastaan. (Lakervi E., 1998)

Alkuoikosulkuvirtaa seuraa yleensä muutostilan oikosulkuvirta I_k' , joka on syntyhetken jälkeinen vaihtovirtakomponentin tehollisarvo. Muutostilan oikosulkuvirta on eräänlainen siirtymäarvo epäsymmetrisessä vikavirrassa, sillä se kuvaa oikosulkuvirran vaimenemista alkuoikosulkuvirrasta pysyvän tilan oikosulkuvirtaan. Symmetrisen vikavirran tapauksessa kaikki kolme eli alku -, muutostilan- ja pysyvän tilan oikosulkuvirrat ovat yhtä suuret paitsi, jos vikapaikan läheisyydessä on tahtikoneita. (Lakervi E., 1998)

Katkaisuhetken oikosulkuvirralla tarkoitetaan nimensä mukaisesti vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa sillä hetkellä, kun katkaisijoiden koskettimet aukeavat. Tarkasteltaessa säteittäistä verkkoa voidaan katkaisuoikosulkuvirta määritellä laskemalla vikakohtaan liitettyjen haarojen katkaisuoikosulkuvirtojen summa. Mikäli kyseessä on laaja syöttävä verkko, voidaan käyttää katkaisuoikosulkuvirran sijasta käyttää alkuoikosulkuvirran arvoa mitoittaessa verkonkatkaisijoita. (IEC, 1988)

Muutostilan oikosulkuvirralla on vaikea määrittää yksittäistä arvoa, sillä se vaimenee koko esiintymisaikansa ajan. Tämän vuoksi se jätetäänkin usein pois oikosulkulaskennasta. Releiden toiminta tapahtuu kuitenkin yleensä muutostilan oikosulkuvirran aikana, mutta toimintahetken virtaa kutsutaan katkaisuhetken oikosulkuvirraksi I_b . (Lakervi E., 1998)

2.2.2 Pysyvän tilan oikosulkuvirta

Pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k on virta, joka saavutetaan muutosten ja vaimentumisen jälkeen. Vaikka se kuulostaa selkeimmin määriteltävältä oikosulkuvirralla, on pysyvän tilan oikosulkuvirrassa suuri määrä siihen vaikuttavia tekijöitä ja yksiselitteisen arvon määrittäminen on usein hyvin monimutkaista ja epätarkkaa. Pysyvän tilan oikosulkuvirtaan vaikuttavat jokaisen verkossa olevan komponentin ominaisuudet, kuten muuntajien automaattiset jännitesäädöt ja tahtikoneiden magnetointitapa. Epätahtikoneet eivät poikkeuksellisesti yleensä vaikuta pysyvän tilan oikosulkuvirtaan, mutta vikojen ollessa hyvin epäsymmetrisiä, on sekin mahdollista. (INSKO, 1973)

Verkon mitoituksen kannalta ei yleensä ole tärkeää saada selville pysyvän tilan oikosulkuvirran tarkkaa arvoa vaan pikemminkin maksimiarvo. Kuten luvussa 2.3.3 mainittiin, oikosulkusuojaus toimii yleensä ennen kuin vikavirta saavuttaa pysyvän tilan arvonsa, joten pienintä pysyvän tilan oikosulkuvirtaa ei useimmiten tarvita. (IEC, 1988)

Kun vikapaikkaa syötetään useasta suunnasta, saadaan syöttävien haarojen summasta laskettua pysyvän tilan oikosulkuvirta. Tulee kuitenkin muistaa, että generaattoreille ja niiden muuntajille tulee käyttää katkaisuhetken oikosulkuvirtaa. Tällöin laskussa otetaan huomioon generaattorin mahdollinen tahdistaputoaminen, joka saa katkaisijan toimimaan. Mikäli tarkasteltava verkko on silmukoitu, voidaan pysyvän tilan oikosulkuvirtana käyttää verkon alkuoikosulkuvirtaa, jossa ei ole huomioitu moottoreiden vaikutusta. (INSKO, 1973)

2.2.3 Sysäysoikosulkuvirta

Sysäysoikosulkuvirta I_s on suurin mahdollinen vikavirran arvo, jonka se saavuttaa usein noin 10 ms kuluttua vian tapahtumishetkestä. Sysäysoikosulkuvirta voidaan laskea alkuoikosulkuvirran arvosta ja sen arvoa hyödynnetään yleensä aseman komponenttien mitoituksessa. Arvon suuruuteen vaikuttavat voimakkaasti verkon pyörivät koneet, verkon kuormitus ennen vikaa sekä vian syntyhetki. Sysäysoikosulkuvirran laskentaan tulee tuntea sysäyskerroin, jonka suuruus määräytyy verkon resistanssin ja reaktanssin välisestä suhteesta, joiden osamäärän perusteella kertoimelle saadaan haettava arvo. Kertoimen tarkempaan määrittelyyn ei tässä työssä syvennytä. (ABB-yhtiöt, 2000) (IEC, 1988)

2.2.4 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta

Oikosulun tapahtuessa johtimet kokevat usein voimasta lämpötilan nousua, ja tämä terminen oikosulkuvirta I_{th} on otettava huomioon verkon mitoituksessa, jotta välttäisiin suurilta rakenteellisilta vaurioilta oikosulun sattuessa. Johdinvalmistajat antavat usein valmistetiedoissa tuotteilleen taulukon, josta voidaan nähdä johtojen terminen kestoisuus lämpötilana ja sitä vastaavana aikana. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, kuinka kauan johdin kestää tiettyä lämpötilaa oikosulkutilanteessa. (Salminen, 2008)

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta voidaan laskea käyttäen hyväksi tasa- ja vaihtovirtakomponenttia m ja n . Tasavirtakerroin voidaan määrittää oikosulun keston sekä sysäyskertoimen suuruuden avulla sitä varten suunnitellusta kuvaajasta. Vaihtovirtatekijä puolestaan määräytyy alkuoikosulkuvirran, pysyvän tilan oikosulkuvirran sekä oikosulun keston mukaan ja sen määrittämistä varten on myös oma kuvaajansa. Kuvaajien tarkempi tarkastelu ei olisi tämän työn kannalta mielekäästä, joten niitä ei käydä läpi. (Salminen, 2008)

2.3 Maasulku

Standardi SFS 6001 määrittelee maasulun seuraavasti (SFS, 2005): ”Vian aiheuttama johtava yhteys päävirtapiiriin vaihejohtimen ja maan tai maadoitetun osan välillä. Johtava yhteys voi syntyä myös valokaaren kautta. Kahden tai useamman vaihejohtimen maasulkuja saman järjestelmän eri kohdissa kutsutaan kaksois- tai moninkertaisiksi maasuluiksi.”

Yleisimmät maasulut ovat vaihejohtimen valokaaria tai suoria kosketuksia maadoitettuun verkon osaan. Tällaisessa tilanteessa kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta ja maadoituksen resistanssista. Kosketusjännite pyritään suojauksella laskemaan sellaiseen arvoon, että se ei aiheuta hengenvaarallista kammiovärinää sydämeen. Sallittu arvo voidaan määrittää SFS 6001 standardin mukaan kehon kautta kulkevan virran, vian kestoajan ja kehon impedanssin mukaisen virran kulkureitin avulla (Partanen & Lakervi, 2012). Verkon maasulkusuojausta voidaan siis parantaa maadoituksilla, lyhyemmillä laukaisuajoilla ja pienentämällä itse maasulkuvirtaa. Yleisin tapa pienentää maasulkuvirtaa on joko jakaa verkko erillisiin osiin galvaanisesti tai sammutuskuristimien avulla. (Paavola, 1970)

Verkossa esiintyvän maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa verkon maadoitus, joten vikaa ei voida tarkastella oikosulkuna. Yleisimmät verkkojen maadoitustavat ovat: maasta erotettu verkko, sammutettu verkko, impedanssin kautta maadoitettu verkko ja suoraan maadoitettu verkko. Kahdessa viimeksi mainitussa tapauksessa yksivaiheinen maasulku saattaa aiheuttaa hyvin korkean vikavirran, joka vastaa oikosulkuvirtaa. Tämä on kuitenkin mahdollista vain, jos verkko on maadoitettu suoraan tai pienen impedanssin kautta. Myös lisääntyvä maakaapelointi saa maasulkuvirrat kasvamaan ja tätä käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.3. (Paavola, 1970)

Suomen jakeluverkot ovat joko maasta erotettuja tai sammutettuja verkkoja, jolloin maadoitus tapahtuu tähtipisteeseen kytketyn induktanssin eli sammutuskuristimen kautta. Sen tehtävä on pienentää maasulkuvirtaa sekä loiventaa vikapaikan palaavaa jännitettä. Induktanssin suuruuden tulisi vastata suunnilleen verkon johtojen maakapasitanssin muodostamaa reaktanssia. Sammutuskuristimen asettelu tapahtuu niin, että sen kautta kulkeva virta olisi suunnilleen yhtä suuri kuin maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summa. Sammutetun verkon suosio perustuu lähinnä Suomen maaperään ja sen korkeaan ominaisresistanssiin, mikä puolestaan voi aiheuttaa korkean kosketusjännitteen. (Partanen & Lakervi, 2012)

Maasta erotettu verkko on suojauksen näkökulmasta suhteellisen hankala, sillä maasulun sattuessa esiintyvät vikavirrat ovat hyvin pieniä. Vikaantuneessa vaiheessa vikavirrat voivat olla kuormitusvirtaa pienempiä ja jännite lähellä nollaa. Vastaavasti terveiden vaiheiden jännitteet nousevat suuruusluokkaan, joka saattaa ylittää eristeiden jännitelujuuden. Vikaresistanssin ollessa lähes nolla terveiden vaiheiden jännitteet nousevat tavallisesti pääjännitteiden suuruiseksi. Tietyillä vikaresistanssin arvoilla jännitteet voivat kohota jopa pääjännitteitä suuremmiksi. Vian epäsymmetria saa verkon tähtipisteen poikkeamaan maapotentiaalista, jolloin tähtipisteen ja maan välille syntyy potentiaaliero. Näiden kahden pisteen välinen jännite on yhtä suuri kuin jännite, joka syntyy maasulkuvirran kulkiessa maakapasitanssien läpi (ABB-yhtiöt, 2000).

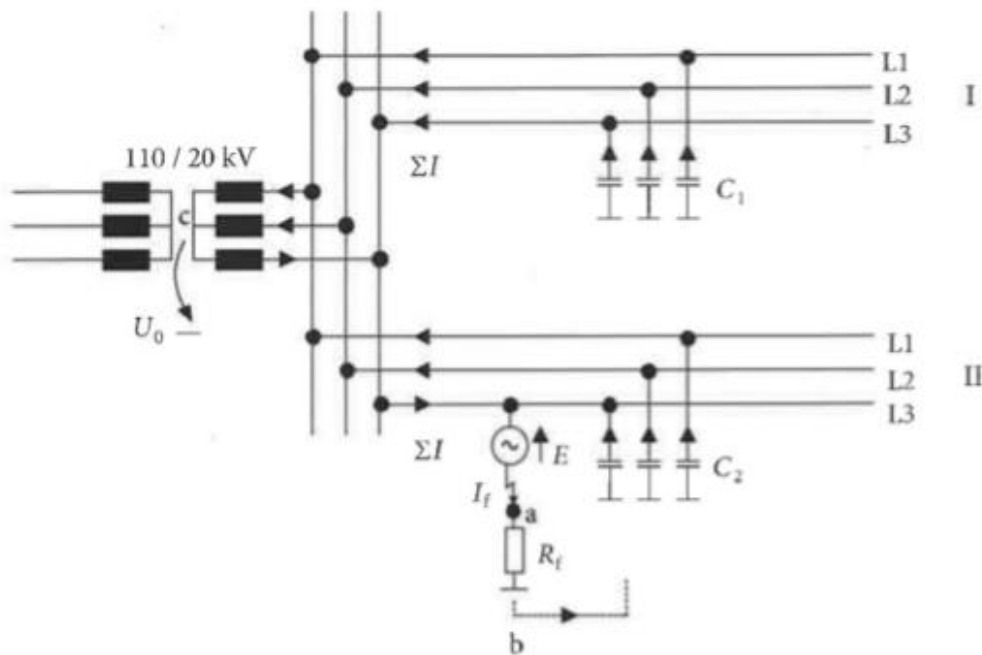
Kun maasta erotetussa verkossa tapahtuu maasulku, jossa syntyy valokaari, ei valokaari yleensä sammu itsestään vaan vaatii johto-osuuden hetkellisen irrottamisen verkosta. Pieni virta saa valokaaren sammumaan itsestään hetkellisesti, mutta palaava jännite saa valokaaren syttymään uudelleen. Tällaisia tapahtumia kutsutaan katkeileviksi valokaarimaasuluiksi ja ne saattavat aiheuttaa suurta vauriota verkkoon ylijännitepiikkien vuoksi. (Mörsky, 1993)

Maasulun sattuessa sammutetussa verkossa terveiden vaiheiden jännitteet käyttäytyvät maasta erotetun verkon tavoin eli niiden jännitteet nousevat suunnilleen pääjännitteiden suuruiseksi. Sammutetun verkon induktanssi kuitenkin lyhentää ylijännitteiden kestoaikaa, kompensoimalla maakapasitanssia tähtipisteen ja maan välisellä induktanssilla. Sama induktanssi estää myös verkossa tapahtuvat katkeilevat valokaarimaasulut, sillä induktanssi tekee vikapaikan palaavista jännitteistä huomattavasti loivempia kuin maasta erotetun verkon tapauksessa. Pienemmät ylijännitteet säästävät myös verkon eristystä ja näin vältetään maasulkua seuraavilta eristeivioista aiheutuvilta oikosuluilta. (Mörsky, 1993) (Paavola, 1970)

Tähtipisteestä pienellä impedanssilla maadoitetussa verkossa vikavirrat ovat huomattavasti kahta edellä mainittua verkkoa korkeammat. Niin suoraan maadoitetussa kuin pienellä impedanssilla maadoitetussa verkossa vikavirrat voivat nousta jopa oikosulkuvirtojen suuruiseksi. Tämä tekee vikavirtojen havaitsemisesta huomattavasti helpompaa, jolloin vikapaikassa esiintyvä suuri verkon rasitus saadaan poistettua nopeasti. Impedanssilla maadoitetussa ja suoraan maadoitetussa verkossa terveiden vaiheiden jännitteet nousevat huomattavasti vaihejännitettä suuremmaksi, mutta verkon pieni kokonaisimpedanssi saa kasvun pysähtymään yleensä pääjännitettä matalampiin arvoihin, mikä puolestaan johtaa suurempiin virtoihin. Tällaisilla verkkotyypeillä oikosulkusuojaus havaitsee yleensä terveiden vaiheiden virran kasvun, kuten myös viikaantuneen vaiheen, ja reagoi ennen maasulkusuojausta. (Elovaara, 1993)

2.3.1 Maasta erotetun verkon maasulkuvirta

Maasta erotetulla verkolla tarkoitetaan verkkoa, jonka nollapiste ei ole galvaanisesti yhteydessä maahan. Toisin sanoen verkko on kelluva ja tämä vaikuttaa suuresti sen käyttäytymiseen maasulkutilanteessa. Maasulkuvirran suuruuteen maasta erotetussa verkossa vaikuttaa suuresti verkon koko sekä vikaresistanssi. Verkon koko on suurin tekijä, sillä maasulkuvirta muodostuu suoraan verrannollisena sitä tuottavien johtimien pituuteen. Kuvassa 2.6 on esitetty maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa. (Tulomäki, 2017)



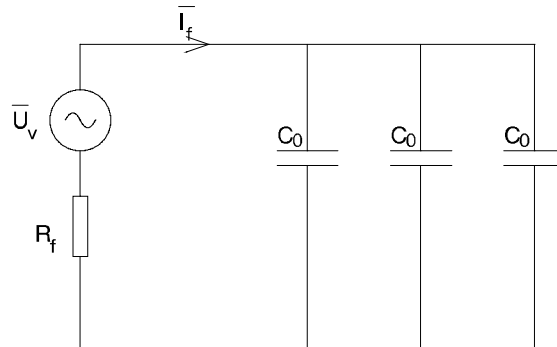
Kuva 2.6. Maasta erotetun verkon maasulkuvirta (Partanen & Lakervi, 2012)

Vian tapahtuessa jokaisen johtimen oma kapasitanssi synnyttää kapasitiivisia maasulkuvirtoja, jotka kulkeutuvat muuntajan tähtipisteen kautta vikapaikkaan ja siitä maahan. Vian ollessa vastukseton, viallisen vaiheen ja maan välille ei synny potentiaaliero, eikä viallinen vaihe johdin syötä maasulkuvirtaa. Jos maasulussa ilmenee vikaresistanssia, viallinen johdin syöttää osan vikavirrasta, joka puolestaan kulkeutuu maakapasitanssin kautta sähköasemaa kohti. Viallisessa lähdössä terveet vaiheet syöttävät vikavirtaa kohti sähköasemaa ja viallisessa vaiheessa virta on sähköasemalta vikaa kohti (Tulomäki, 2017).

Suojarele mittaa kolmen vaiheen summavirtaa, suorassa eli resistanssittomassa maasulussa terveiden lähtöjen kaksi vaihejohdinta syöttää maasulkuvirtaa. Jos viassa esiintyy vikaresistanssia, se saa kaikki kolme vaihejohdinta syöttämään maasulkuvirtaa, jonka suuruus riippuu lähdön pituudesta. Suojarele mittaa tässä tapauksessa näiden kolmen vaiheen summavirtaa. (Tulomäki, 2017)

Maasulun tapahtuessa viallisen vaiheen jännite pienenee, mikä saa nollajännitteen ja terveiden vaiheiden jännitteet kasvamaan. Viallisen vaiheen ja nollajännitteen summa on yhtä suuri kuin normaali vaihejännite. Jos vika on täysin vastukseton tai sen resistanssi on hyvin pieni kasvaa nollajännite siis vaihejännitteen suuruiseksi. Mikäli nollajännite ei pääse kasvamaan eli vikaresistanssi on suuri, on maasulun havaitseminen todella haastavaa. (Tulomäki, 2017)

Maasulun sattuessa maasulkuvirralla on kulkureitti vikapaikasta maahan sekä vaihejohtimien impedanssien ja johtojen maakapasitanssien kautta muuntajan käämitykseen ja sieltä viallisen vaiheen kautta vikapaikkaan. Maasulun aikana vaihejohtimien maakapasitanssit ovat hyvin suuria verrattuna muuntajan ja johtimien pitkittäisimpedansseihin, joten maasulkulaskelmissa pitkittäisimpedanssit voidaan jättää huomiotta. Maasulkulaskelmia tehtäessä verkkoa mallinnetaan yleensä kuvan 2.7 mukaisella Theveninin sijaiskytkennällä. (Hänninen, 2001) (Lakervi E., 1998)



Kuva 2.7. Theveninin sijaiskytkentä maasulusta (Lakervi E., 1998)

Sijaiskytkennässä Theveninin lähde edustaa maasulkupaikkaa ja lähteen lähdejännite on vioittuneen vaiheen vaihejännite ennen vikaa. Maasulkuvirran lausekkeeksi saadaan sijaiskytkennästä.

$$I_f = \frac{\underline{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega C R_f} \underline{U}_v \quad (2.10)$$

missä

R_f	vikaresistanssi
\underline{U}_v	vikaa edeltänyt vaihejännite
C	maakapasitanssi

Maasulkuvirran laskentaan on myös toinen tapa, jossa verkon sijaiskytkentää tarkastellaan myötä-, vasta- ja nollaverkon näkökulmasta. Tässä tarkastelussa vikapaikan sijainti on olennainen osa laskentaa, sillä se kertoo, mitkä verkon komponentit tulee huomioida kokonaisimpedanssissa. Maasulkuvirta voidaan ratkaista kaavan 2.11 mukaisesti. (IEC, 1988)

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0 + \underline{Z}_2|} \quad (2.11)$$

missä

\underline{Z}_1	oikosulkupiirin myötäimpedanssi
\underline{Z}_2	oikosulkupiirin vastaimpedanssi
\underline{Z}_0	verkon nolaimpedanssi

Theveninin sijaiskytkennästä voidaan johtaa myös nollajännitteen eli tähtipisteen jännitteelle kaava.

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{j3\omega C} * (-I_f) = \frac{-1}{1+j3\omega CR_f} \underline{U}_v \quad (2.12)$$

Edellä mainitut kaavat antavat laskennallisesti riittävän tarkkoja tuloksia maasulusta, mutta käytettäessä kuvan 2.7 mukaista sijaiskytkentää, jätetään usein huomiotta maasulun aikaiset fysikaaliset tapahtumat. (Elovaara, 1993) (Partanen & Lakervi, 2012)

Tarkasteltaessa ilmajohdoista koostuvaa verkkoa, voidaan laskennassa käyttää yksinkertaistettua kaavaa:

$$I_f = \frac{U * l}{300} \quad (2.13)$$

missä

U tarkasteltavan verkon osan pääjännite kilovoltteina

l tarkasteltavan osan pituus

Kaavat 2.10 ja 2.11 antavat maasulkuvirralla arvon, joka voidaan mitata vikapaikassa, mutta kun halutaan laskea releen näkemä maasulkuvirta I_r , tulee käyttää kaavaa 2.14 (Partanen & Lakervi, 2012):

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} I_f \quad (2.14)$$

missä

C galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maakapasitanssi/vaihe

C_j vikaantuneen lähdön maakapasitanssi/vaihe

Maasta erotetun verkon maasulkuvirta on yleensä suhteellisen pieni, mutta suuruuteen vaikuttaa päämuuntajaan galvaanisesti kytketyn verkon pituus. Keskimäärin voidaan arvioida, että 20 kV avojohtoverkon synnyttämä maasulkuvirta on noin 0,067 A/ km. Maakaapelit puolestaan aiheuttavat huomattavasti suurempia virtoja korkean maakapasitanssien vuoksi ja ne saattavat kaapelityypistä riippuen olla 2,7-4 A/km. Maakaapeleiden valmistaja ilmoittaa kaapelin tiedoissa kyseiselle kaapelille ominaiset maakapasitanssiarvot ja näitä arvoja tulisi aina käyttää maasulkulaskelmissa. (Hänninen, 2001)

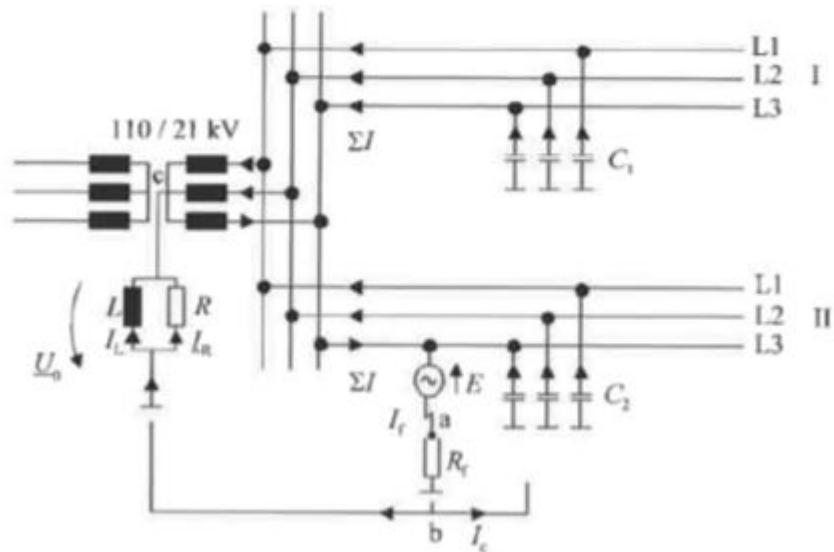
2.3.2 Sammutetun verkon maasulku

Sammutettu verkko tarkoittaa verkkoa, jossa syntyvää maasulkuvirtaa rajoitetaan kuristimella. Tätä toimenpidettä kutsutaan sammutukseksi ja se perustuu kapasitiivisen maasulkuvirran kompensoimiseen kuristimella, joka tuottaa induktiivista maasulkuvirtaa. (Partanen & Lakervi, 2012)

Sammutettua verkkoa suunniteltaessa tulee tuntee verkossa syntyvän kapasitiivisen maasulkuvirran suuruus, jotta sitä kompensoiva induktiivinen virta voidaan asetella vastaavan suuruiseksi. Induktiivinen virta saadaan aikaan sijoittamalla yhteen tai useampaan verkon tähtipisteeseen sammutuskuristin, joka saa aikaan edellä mainitun induktiivisen virran. (Tulomäki, 2017)

Kuristimia voidaan sijoittaa verkkoon hajautetusti tai keskitetysti. Hajautetussa kompensoinnissa useita pienempiä kuristimia on sijoitettu verkon varrelle niin, että koko verkko on tasaisesti kompensoitu. Keskitetty kompensointi sen sijaan tarkoittaa sähköasemalle sijoitettua kuristinta, joka on tarpeeksi suuri kompensoimaan kaikki päämuuntajan syöttämän verkon alueelle syntyvät kapasitiiviset maasulkuvirrat. Keskitetyn kompensoinnin käyttöä rajoittaa hyvin voimakkaasti tähtipisteen kuormitettavuus, joka saattaa muodostua suurilla alueilla rajoittavaksi tekijäksi. Keskitetyn kompensoinnin haittapuoleksi voidaan lukea myös se, ettei sammutuskuristin toimi päämuuntajan ollessa irti verkosta. (Tulomäki, 2017)

Maasulun tapahtuessa kuristimen läpi kulkee induktiivinen nollavirta, joka kompensoi verkon synnyttämää kapasitiivista nollavirtaa. Jäljelle jää useimmiten noin 5-10 % siitä maasulkuvirran arvosta, joka se olisi vastaavassa maasta erotetun verkon tapauksessa. Kuvassa 2.8 on esitetty maasulkuvirran kulku keskitetysti sammutetussa verkossa. (Partanen & Lakervi, 2012)



Kuva 2.8. Maasulku sammutetussa verkossa (Partanen & Lakervi, 2012)

Yksivaiheisen maasulun sattuessa, maahan kulkee vain hyvin pieni osa vikavirrasta itse vikapaikassa. Pääosa vikavirrasta kulkeutuu maahan verkon sammutuskuristimen kautta. Vikapaikan kautta kulkevan virran suuruuteen vaikuttaa muun muassa verkon yliaallot sekä resistiivinen vuotovirta. Resisttiivisellä vuotovirralla tarkoitetaan verkon häviöistä sekä kuristimen vastuksesta aiheutuvaa virtaa. (Tulomäki, 2017)

Vikojen havaitseminen sammutetussa verkossa perustuu nollavirran resistiiviseen osaan, jonka arvo on vain muutamia ampeereja vikavastuksen ollessa nolla. Hyvin pieni vikavirta aiheuttaa suojaukselle haasteita ja siltä vaaditaan hyvin suurta herkkyyttä, sillä vika tulisi olla havaittavissa myös vikavastuksen kasvaessa. Verkon tarkailua varten tarvitaan hyvin tarkasti mittaavat nollajännite- sekä summavirtamuuntajat, sillä suojalaitteiden tarkkuus voi vaikuttaa ratkaisevasti mitatun vikavirran arvoon. (Tulomäki, 2017)

Sammutetuissa verkoissa esiintyy nollajännitettä silloinkin, kun verkossa ei ole vikaa. Tämä johtuu verkossa olevien kapasitanssien epäsymmetriasta ja sitä voidaan pienentää symmetroimalla maakapasitansseja tai lisäämällä tähtipistevastuksia. (Tulomäki, 2017)

2.3.3 Maadoitus- ja kosketusjännite

Maasulkuvirta saa aikaan maasulkujännitteen, jota voidaan kuvata vikavirran ja maadoitusresistanssin tulona:

$$U_m = I_f * R_m \quad (2.15)$$

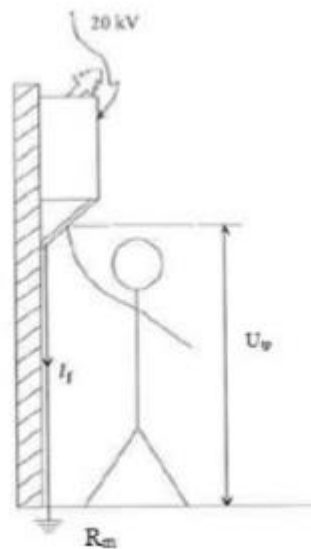
missä

I_f vikavirta maasulussa

R_m maadoitusresistanssi

Maadoitusjännitteen tarkastelu on maasulussa tärkeää, koska se aiheuttaa kosketusjännitteen. Kosketusjännite määritellään jännitteeksi, joka on ihmisen tai eläimen koskettavissa vikahetkellä ja sen suuruuteen vaikuttavat suojamaadoitusjohtimen impedanssi sekä vikatilanteen seurauksena syntyneen oikosulkuvirran suuruus. SFS-6001 standardi asettaa kosketusjännitteelle sallitut raja-arvot, joiden suuruus muuttuu vian keston mukaan. (Partanen & Lakervi, 2012) (Tulomäki, 2017)

Kuvassa 2.1 voidaan nähdä, kuinka kosketusjännite syntyy. Kuvan esittämässä tapauksessa vikavirralla on kaksi mahdollista kulkureittiä maahan, jotka ovat ihmisen läpi ja maadoitettua osaa pitkin. (Tulomäki, 2017)



Kuva 2.9. Kosketusjännite maasulun aikana (Tulomäki, 2017)

Taulukossa 2.1 on esitetty kehon läpi kulkevan virran arvot, joilla on tilastollisesti noin 5% todennäköisyys saada aikaan kammioväriä. Taulukosta voidaan huomata, että ihmiskehon impedanssi muuttuu jännitteen funktiona, ja virrat on muutettu sen mukaan sallituiksi kosketusjännitteiksi taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Suurin sallittu kehon kautta kulkevan virran suuruus vian kestoajan funktiona (SESKO RY, 2015)

Vian kesto aika t_f (s)	Kehon kautta kulkeva virta I_b (mA)
0,50	900
0,10	750
0,20	600
0,50	200
1,00	80
2,00	60
5,00	51
10,00	50

Taulukko 2.2. Kosketusjännitteen suuruus vian keston mukaan (SESKO RY, 2015)

Vian kesto aika t_f (s)	Sallittu kosketusjännite U_{TP} (V)
0,50	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Lyhyellä vian kestolla kosketusjännitteiden sallittu arvo voi olla huomattavasti korkeampi kuin pitkällä kestoajoilla. Vian kesto aika on suoraan verrannollinen releen toiminta-aikaan, joten asettelu arvoilla on suuri merkitys sallittujen kosketusjännitteiden suuruudessa.

Kosketusjännitteen suurimpien sallittujen arvojen perusteella voidaan laskea suurin sallittu maadoitusjännite kaavalla:

$$U_m \leq k * U_{TP} \quad (2.16)$$

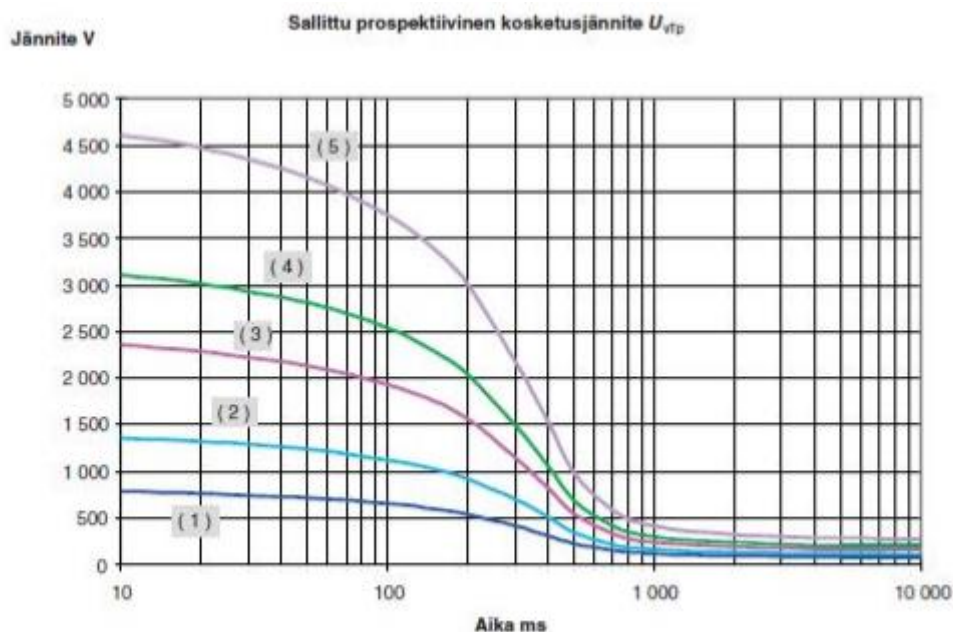
missä

k olosuhteista riippuva kerroin

U_{TP} ihmisen kosketeltavissa oleva jännite maasulun aikana

Parhaassa tapauksessa kerroin saa arvon 2, jolloin sekä muuntaja että pienjännite verkko ovat maadoitettuja. Joskus tekniset ja taloudelliset seikat saattavat vaikeuttaa tavoitetasen saavuttamista, jolloin voidaan tiettyjen ehtojen puitteissa käyttää myös arvoja 4 ja 5. Nämä ehdot liittyvät huonoihin maadoitusolosuhteisiin, muuntamoiden potentiaalinhjaukseen, liittymien maadoituksiin sekä liitettyjen rakennusten potenti- aalinhjaukseen. (Partanen & Lakervi, 2012)

Kuvassa 2.10 on esitetty kosketusjännitteiden monikertoja.



Kuva 2.10. Kosketusjännitteiden monikerrat (Tulomäki, 2017)

Määritettäessä maasulkusuojausajan toiminta-aikoja, voidaan käyttää apuna kuvan 2.10 kaltaista käyrästä, josta nähdään kosketusjännitteiden monikerrat. Korkeimmillaan kosketusjännite voi olla maadoitusjännitteen suuruinen, eli yhtä suuri kuin vaihejohtimen ja maan välinen jännite.

Sallittujen kosketusjännitetasojen saavuttamiseen on käytännössä kolme vaihtoehtoa: releiden toiminta-ajan lyhentäminen, maasulkuvirran pienentäminen ja maadoitusten parantaminen. Näistä vaihtoehtoista helpoin ja edullisin, mutta samalla rajallisin on releiden toiminta-ajan lyhentäminen. Lyhyemmillä toiminta-ajoilla voidaan saada nostettua sallittu kosketusjännitetaso korkeammaksi, mutta sitä voidaan tehdä hyvin pienissä määrin, sillä lyhyet toiminta-ajat lisäävät virhelaukaisun riskiä merkittävästi. Toinen vaihtoehto, eli maasulkuvirran pienentäminen, voidaan toteuttaa esimerkiksi sammutuskuristimilla. Maasulkuvirran pienentäminen vaatii yleensä rakenteellisia uudistuksia ja laiteinvestointeja, jotka ovat kalliita toteuttaa. Kolmas tapa, eli maadoitus-

ten parantaminen, on käytännössä mahdollista vain uuden verkon rakentamisen yhteydessä, jolloin maahan voidaan sijoittaa erillisiä maadoitusjohtimia. Nämä johtimet tekevät maasta paremmin sähköä johtavan ja verkon maadoitus on tehokkaampi. (Tulomäki, 2017)

2.3.4 Katkeilevat maasulut

Katkeilevat maasulut tarkoittavat kaapelin eristyksen pettämistä useaan kertaan suhteellisen lyhyessä ajassa. Tällainen vika syntyy useimmiten eristemateriaalin ikääntyessä, jolloin sen jännitelujuus saattaa heikentyä. Myös epäpuhtaudet ja eristemateriaaliin kohdistuva mekaaninen rasitus voi lyhentää merkittävästi eristeen käyttöikää. (Tulomäki, 2017)

Katkeilevassa maasulussa haurastunut eriste pettää ja tapahtuu läpilyönti, joka sammuu itsestään hyvin nopeasti. Läpilyönti saattaa toistua useita kertoja peräkkäin, mutta sammuu aina itsestään luonnollisessa nollakohdassa. Vian sammussa jännite palautuu viallisessa vaiheessa normaalin vaihejännitteen arvoon ja nollajännite pienenee normaaliin arvoonsa. Vian tapahtuessa useamman kerran, nollajännitteen arvo säilyy korkeampana, sillä sen muutokset ovat virtaa tasaisempia. (Tulomäki, 2017)

Perinteisten suojareleiden on hankala suojata verkkoa katkeilevilta maasuluilta. Tämä johtuu nollavirran epäsäännöllisyydestä, jota maasulun suuntarele ei havaitse. Katkeilevassa maasulussa nollavirran epäsäännöllinen käyttäytyminen sen sijaan saa sähköaseman ylivirtareleen havahtumaan, jolloin sen laukaisu tekee koko aseman jännitteettömäksi. Vikapaikan maadoitusresistanssilla, vikavastuksella sekä vian sijainnilla on suuri vaikutus vikaan, sillä se vaimenee kaapeliverkossa hyvin nopeasti etäisyyden kasvaessa sähköasemaan. Kaapeliverkossa tapahtuva vika vaimenee avojohtoa nopeammin, sillä kaapelin nollapiirin resistanssi on huomattavasti avojohtoa suurempi. Katkeilevat maasulut ovat verkonsuojauksen kannalta vaikeita, sillä ne aiheuttavat paljon ylimääräisiä laukaisuja. (Tulomäki, 2017)

3. VIKAVIRTOJEN LASKENTAMENETELMÄT

3.1 Haasteet

Verkon vikavirtojen tarkka määrittely ja verkon suojaus on keskeytymättömän jakelun ja laitteistojen kunnon kannalta hyvin tärkeää, mutta vikavirtojen suuri vaihtelu tuottaa usein vaikeuksia. Vaihtelu johtuu verkon sen hetkisestä kytkentätilasta ja vikatyypistä. Lähdetessä tarkastelemaan verkon vikavirtoja on myös otettava huomioon verkon kehittyminen ja millaisia muutoksia mahdolliset laajennukset saavat aikaan vikavirtojen arvoissa. Tästä syystä verkkojen laskenta tehdään useimmiten likimäärin ja saadut arvot ovat yleensä hieman todellisia suurempia.

Vikavirtalaskennassa tärkein kysymys on käyttötarkoitus, sillä erilaiset laskentamenetelmät painottavat tarkkuutensa eri asioihin ja esimerkiksi käytönvalvoja ei välttämättä tarvitse samoja arvoja samoilla tarkkuuksilla kuin verkon suunnittelija. Käyttötarkoitusta mietittäessä on myös huomioitava tarkasteltavan verkon koko. Laajalla verkolla käsin laskenta on hyvin työläs tehtävä ja yleensä epätarkka toteutettava.

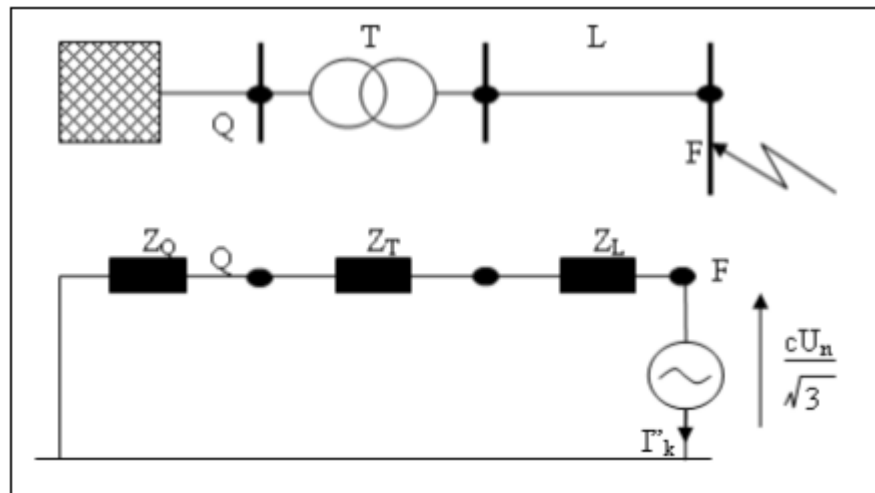
Tietokonesovellukset tarjoavat nopean ja tarkan standardeihin pohjautuvan laskentatavan ja niiden avulla voidaan tarkastella suhteellisen helposti yksittäisiä vikavirtoja. Tässä työssä on itse tehdyn manuaalisen laskennan lisäksi käytössä DMS-600 ohjelmisto, jota KSAT käyttää sekä verkon suunnitteluun että käytön valvontaan.

3.2 Theveninin menetelmä

Theveninin menetelmän tarkoituksena on yksinkertaistaa vikaantunut verkko tai verkon osa laskentaa varten. Tämä voidaan toteuttaa theveninin sijaiskytkennällä, jossa kolmivaiheisesta verkosta muodostetaan yksivaiheinen sijaiskytkentä oikosulkutarkastelua varten. Verkon komponentit kuvataan tarkastelua varten niitä vastaavilla oikosulkuimpedansseilla. Saatuun sijaiskytkentään sijoitetaan ekvivalenttinen jännitelähde, joka syöttää verkkoa. (SFS, 2005)

Kuvassa 3.1 on esitetty kolmivaiheinen oikosulku ja sitä vastaava theveninin sijaiskytkentä. Kuten luvussa 2.1.1 mainittiin, ovat vikavirrat lähes aina suurimmat kolmivaiheisessa oikosulussa. Kyseinen vika on myös laskennaltaan yksikertaisimpia oikosulkulaskelmia, joten sen käyttäminen esimerkkitapauksena on luontevaa. Kuvassa

verkko on kuvattu ylempänä ja siinä annetut impedanssit ovat oikean verkon komponentteja Q, T ja L vastaavia oikosulkuimpedansseja. Kuvassa 3.1 ilmoitettu I_k'' on tässä tapauksessa vikapaikassa ilmenevä oikosulkuvirta I_k . (SFS, 2005)



Kuva 3.1. Ilmoitettu I_k'' on tässä tapauksessa vikapaikassa ilmenevä oikosulkuvirta I_k . Vikaantunut malliverkko ja sitä vastaava theveninin sijaiskytkentä (IEC, 1988)

Kuvassa 3.2 on esitetty Theveninin menetelmässä käytettävät kertoimet eri jännitetasojen mukaan. Nämä kertoimet sijoitetaan oikosulkulaskennassa mainittuihin kaavoihin, joihin ne on merkitty.

Nimellisjännite U_n	Jännitekerroin c	
	maksimi oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{max}	minimi oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
Pienjännite 100V-1000V		
a) 230V/400V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1kV-35kV	1,10	1,00
Suurjännite 35kV-230kV	1,10	1,00

Kuva 3.2. IEC 909 standardin määrittelemä jännitekerroimen c arvo ((IEC), 1988,)

Sijaiskytkennän kautta kolmivaiheinen oikosulku on symmetrisyytensä ansiosta helppo tarkasteltava. Kun halutaan mallintaa muita vikatyyppejä, vian vaikutus ei ole kaikissa vaiheissa sama ja tämä tulee ottaa huomioon laskelmissa.

3.3 Ominaisoikosulkuteho

Ominaisoikosulkuteholaskentaa käytetään pääasiassa siirtoverkoissa, sillä se ei yleensä huomioi laskennassa verkon osien resistansseja, vaan keskittyy pelkkään reaktanssin tarkasteluun. Tämä on yksi syy menetelmän epätarkkuuteen, mutta näin myös varmistuu niin sanottu pelivara, koska komponenttien oikosulkuimpedanssi jää todellista arvoa pienemmäksi. Pienemmät oikosulkuimpedanssit tekevät lopullisista laskentatuloksista todellista suurempia, joten alimitoitus ei muodostu ongelmaksi. Menetelmää ei kuitenkaan voida epätarkkuutensa vuoksi käyttää muuten kuin suuntaa antavana apukeinona esimerkiksi nopean arvioinnin tarpeessa. (SFS, 2005)

Laskettaessa verkon vikavirtojen suuruuksia, yksinkertaisin tapa on käyttää ominaisoikosulkuteho-menetelmää. Laskumenetelmä soveltuu parhaiten säteittäisen verkon tarkasteluun silloin, kun tulosten likimääräinen arvo on tarkkuudeltaan riittävä eikä virtojen vaihekulmia tarvita. (SFS, 2005)

Ominaisoikosulkuteho-menetelmässä kuvataan vikavirtoja oikosulkutehon avulla, joka laskennassa muodostuu vikapaikan täydestä oikosulkuvirrasta sekä verkon nimellisjännitteestä. Laskennassa muodostetaan verkon komponenteille kuvitteellinen ominaisoikosulkuteho. Suure on kuvitteellinen, sillä todellisuudessa verkon muut osat rajoittavat kyseisen tehon muodostumista. Kullekin komponentille voidaan laskea oma ominaisoikosulkuteho, ja näitä hyödyntämällä voidaan helposti selvittää alkuoikosulkuvirta. Kuten luvussa 2.3.1 mainittiin, normaalisti alkuoikosulkuvirtaa ei juuri huomioida lopullisissa suojaustarkasteluissa ja verkonsuunnittelussa, mutta sen arvon avulla voidaan laskea useita muita oikosulkusuureiden arvoja. Toisaalta alkuoikosulkuvirtaa voidaan myös käyttää äärimmäisenä vertailukohtana laskentatuloksille. (SFS, 2005)

Kun lähdetään tarkastelemaan verkkoa ominaisoikosulkuteho-menetelmällä, halutaan ensimmäisenä selvittää vikapaikan kokonaisoikosulkuteho. Teho voidaan laskea suhteellisen helposti komponenttikohtaisten ominaisoikosulkutehojen avulla. Tällöin rinnan kytketyt komponentit summataan suoraan yhteen kaavan 3.1 mukaan. Sarjaan kytkettyjen komponenttien tapauksessa lasketaan yhteen ominaisoikosulkutehojen käänteisarvot kaavan 3.2 mukaisesti. (SFS, 2005)

$$S_k = S_1 + S_2 + S_3 + \dots S_n \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots \frac{1}{S_n} \quad (3.2)$$

missä

S_k ominaisoikosulkuteho

$S_1 \dots S_n$ komponenttien ominaisoikosulkutehot

Vian alkuoikosulkuvirta voidaan laskea saadun ominaisoikosulkutehon perusteella kaavalla 3.3.

$$I_k = \frac{1,1 \cdot S_k}{\sqrt{3} U_n} \quad (3.3)$$

Seuraavaksi selvitetään vikapaikkaa syöttävien komponenttien vaikutukset oikosulkuvirtaan. Vaikuttavia komponentteja verkossa ovat muuntaja, generaattorit, kuristimet sekä pyörivät koneet. Epätahtikoneiden vaikutus oikosulkuvirtaan on jätetty tässä tarkastelussa huomiotta. Edellä mainittujen komponenttien tapauksessa ominaisoikosulkutehot voidaan laskea kaavoilla 3.4 ja 3.5.

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z_k} \quad (3.4)$$

$$S_k = \frac{S_n}{z_k} \quad (3.5)$$

missä

S_k	ominaisoikosulkuteho
U_n	verkon komponentin nimellispääjännite ennen vikaa
Z_k	komponentin oikosulkuimpedanssi vaihetta kohden
S_n	komponentin nimellisteho
z_k	oikosulkuimpedanssin suhteellisarvo (tahtikoneen tapauksessa voidaan käyttää koneen tahtireaktanssin suhteellisarvoa)

4. JAKELUVERKON SUOJAUS

4.1 Suojauksen tavoitteet ja suojaukselle asetettavat vaatimukset

Sähköverkon suojaukselle määritellään tietyt periaatteet sekä sähköturvallisuuslain että lukuisten standardien pohjalta. Relesuojausta käsittelevä standardi SFS-IEC 60050-448 määrittelee relesuojaukselle useita kriteereitä. Selektiivisyys tarkoittaa suojauksen kykyä tunnistaa viallinen alue, johto tai vaihe ja erottaa se muusta verkosta, kunnes vika on poistunut. Standardissa määritellään selektiivisyydelle useita tasoja. Aluselektiivisyys tarkoittaa nimensä mukaisesti kykyä tunnistaa vioittunut alue verkosta. Vaiheselektiivisyys taas tarkoittaa kykyä tunnistaa vioittunut johto tai sen vioittunut vaihe. Selektiivisyyden lisäksi standardissa määritellään suojauksen luotettavuus. Relesuojauksen tulisi pystyä suorittamaan vaadittu toiminto vaaditussa toiminta-ajassa riippumatta ulkoisista olosuhteista. Relesuojauksen tulisi myös olla toimintavarma, ja sen ei pitäisi toimia aiheettomasti. (SFS S. s., 2002)

Sähköturvallisuuslaki on sähkölaitteiden ja -laitteistojen osalta hyvin selkeä ja sen mukaan laitteistojen suunnittelu, asennus, huolto ja käyttö on toteutettava niin, ettei siitä aiheudu minkäänlaista vaaraa hengelle, terveydelle tai omaisuudelle. Lakien lisäksi sähköturvallisuus sisältää lukuisia standardeja, jotka ovat käytännössä suosituksia. Standardeista voidaan poiketa, mikäli pystytään osoittamaan muulla tavoin luotettava lakisääteisen turvallisuustason täyttyminen. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996) (Lahti, 2015)

Sähkölaitteistoille tehdään aina käyttöönottotarkastus, jossa todetaan laitteiston turvallisuus erilaisilla mittauksilla, testeillä ja muilla tarkistuksilla. Vastuu käyttöönottotarkastuksesta kuuluu yleensä laitteen valmistajalle ja se tulee aina tehdä ennen laitteiston käyttöönottoa. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996) (Lahti, 2015)

Suojareleiden tapauksessa käyttöönottotarkastuksen yhteydessä releet koestetaan, eli varmistetaan releen oikea toiminta. Ensikoestuksen jälkeen releille laaditaan aina kunnonssapito-ohjelma, joka sisältää tietyin aikavälein tapahtuvat määräaikaiskoestukset. Releiden valmistaja laatii yleensä käyttöohjeen, josta käy ilmi myös suositeltu koestusväli. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996)

4.1.1 Sähkösematarkastukset

Sähköasemille tehdään visuaalisia tarkastuksia suunnitellun kunnossapito-ohjelman mukaisesti neljä kertaa vuodessa. Tarkastusten tarkoituksena on havaita mahdolliset kulumiset, puutteet ja alkavat viat, joita ei voida suoraan nähdä käytönvalvontajärjestelmällä. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996) (Järviö, 2007)

Tarkastuksen päähuomio kohdistuu aseman kytkinlaitteisiin, eristimiin, muuntajiin ja kojeistoihin. Lisäksi tarkastetaan tietysti myös kiinteistön kunto ilmoitus- ja turvalaitteistoihin. Tarkastuksia tehdään sähköturvallisuuden ylläpitovaatimuksen vuoksi ja siinä havaitut viat ja puutteet tulee korjata välittömästi. Jokaisesta tarkastuksesta tulee täyttää myös pöytäkirja. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996) (Järviö, 2007)

4.1.2 Suojareleiden tarkastukset

Suojareleiden tarkastus tapahtuu koestamalla ja koestus tehdään kolmen tai kuuden vuoden välein riippuen, siitä onko rele varustettu itsevalvontaominaisuudella. Muuntajan suojareleet tarkastetaan aina kolmen vuoden välein. Releillä on valmistajan antama elinkaari, jota voidaan tavallisesti pidentää sitä pidentävällä ennakkohuollolla. Huolto sisältää jännitelähteen sekä lähtökortin uusimisen ja se tehdään useimmiten kerran releen elinkaaren aikana. Koestus antaa yleensä arvokasta tietoa releen kunnosta ja elinkaaren vaiheesta ja helpottaa näin ennakoimaan korjauksia ja investointeja. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996) (Järviö, 2007)

Vanhojen mekaanisten releiden tyypillisimpiä vikoja oli koestuksissa ilmi tulevat asetteluarvojen ja toiminta-aikojen muutokset, jotka sitten säädettiin halutuiksi. Nykyaikaisemmat numeeriset releet eivät muuta arvojaan, joten säätämistä ei tarvita, vaan koestuksen tehtävänä on pikemminkin selvittää katkaisupiirin sekä laukaisijan kunto. Sähköverkkoyhtiö voi itse toteuttaa omat relekoestuksensa tai tilata ne releiden toimittajalta tai koestamiseen erikoistuneelta palvelutoimittajalta. (Sähköturvallisuuslaki 410/1996, 1996) (Järviö, 2007)

4.2 Reletyypit

Releet ovat sähköverkon eri suureiden tarkkailuun suunniteltuja suojalaitteita ja niiden tehtävä on havaita sähköverkossa tapahtuvia muutoksia. Releille määritellään aina mitattavan suureen asettelu arvo, johon rele vertaa mitattuja arvoja. Mikäli mitattu arvo poikkeaa asetteluarvosta määrättyyn suuntaan, rele antaa ohjauskäskyn katkaisijalle tai muulle suojalaitteelle, joka erottaa vian muusta verkosta. (Mörsky, 1993)

Sähkömekaaniset releet ovat reletyypeistä vanhimpia ja niiden toiminta perustuu tehollisarvojen mittaukseen. Releet sisältävät nimensä mukaisesti mekaanisia liikkuvia koneistoja, minkä vuoksi releet vaativat runsasta huoltoa vaadittavan toimintavarmuuden ylläpitämiseksi. Sähkömekaaniset releet ovat vaihekohtaisia ja erilaiset toiminnot vaativat erillisen laitteen. Releiden rakenne tekee niiden toiminnasta hidasta, jolloin selektiivisen suojauksen aikaporras kasvaa puhuttaessa hyvin herkistä sovelluksista, ja sähkömekaanisten releiden asettelutarkkuus tai herkkyys ei ole tällaisille sovelluksille riittävä. Releiden rakenteessa on kuitenkin hyviä puolia, sillä oikein huollettuna sähkömekaaninen rele on todella luotettava ja suhteellisen pitkäikäinen. Nykyverkossa on enää hyvin vähän sähkömekaanisia releitä, sillä niiden on vaikea täyttää suojaukselta vaadittavaa herkkyyttä sekä asetteluarvojen tarkkuutta verkonsuojauksessa. (Mörsky, 1993) (Paavola, 1970)

Sähkömekaanisia releitä uudempia ovat staattiset releet. Nämä releet eivät sisällä liikkuvia osia, vaan toiminta perustuu analogiseen elektroniikkaan. Staattisen releen rakenne mahdollistaa huomattavasti sähkömekaanisia releitä suuremman tarkkuuden, toimintanopeuden sekä asetteluarvojen laajuuden. Releet pystyvät myös toteuttamaan huomattavasti sähkömekaanisia releitä vaativampia ja monipuolisempia suojaustoimintoja. Staattinen rele tarvitsee toimiakseen ulkoisen apuenergialähteen, tällöin mittauspiirin kuormitus jää hyvin vähäiseksi ja suojaustarkkuus paranee. Analogiseen elektroniikkaan perustuva rele on käytännössä pienikokoinen ja kulumaton, eikä sitä tarvitse huoltaa. Staattisten releet sisältävät suhteellisen suuren määrän elektroniikkakomponentteja, ja tästä johtuen releiden vikaantumisriski on suhteellisen suuri. (Mörsky, 1993) (DEE-24116, 2015) (DEE-23040, 2015)

Numeeriset releet edustavat releiden viimeisintä sukupolvea, ja niiden toiminta perustuu täysin mikroprosessoreihin ja digitaalitekniikkaan. Releiden tekniikka sallii usean eri toiminnon ja suojauskriteerin integroinnin samaan laitteeseen, mikä on suuri etu verrattuna aiempiin relesukupolviin. Numeeristen releiden etuna on myös jatkuva itsetarkkailu, jonka ansiosta rele voi itse ilmoittaa vikaantumisestaan. Ensimmäisen sukupolven numeeriset releet pystyivät antamaan hälytykset, sekä muut lähtevät tiedot pelkästään kosketintietona, eli yksisuuntaisesti ilmoituksina. Toisen sukupolven numeeriset releet pystyivät välittämään tietoa kaksisuuntaisesti, mikä mahdollisti pelkkien mittaus-, tila- ja asetteluarvojen lukemisen lisäksi releiden asetteluarvojen muuttamisen sekä ohjauskäskyjen antamisen etänä. Numeerisista releistä tuli tämän tekniikan myötä, paitsi suojalaitteita, myös tärkeitä tiedonkeruu- ja ohjausyksiköitä verkossa. (Mörsky, 1993) (ABB, 2016)

Uuden sukupolven numeeriset releet ovat tekniikkansa ansiosta nopeita ja asetteluarvoiltaan erittäin tarkkoja. Mittamuuntajalta tulevat signaalit muunnetaan releellä digitaaliseksi ja niistä suodatetaan pois mahdolliset häiriöt. Releen mikroprosessori vertaa

muunnetun signaalin ja releen asetteluarvoja toisiinsa ja mikäli signaalin arvot ylittävät releen asetteluarvot, rele havahtuu. Havahtuminen käynnistää yleensä aikalaskurin, jolla saadaan aikaan haluttu laukaisuviive. Mikäli vika ei ole poistunut viiveen aikana, rele suorittaa laukaisun. (Mörsky, 1993) (ABB, 2016)

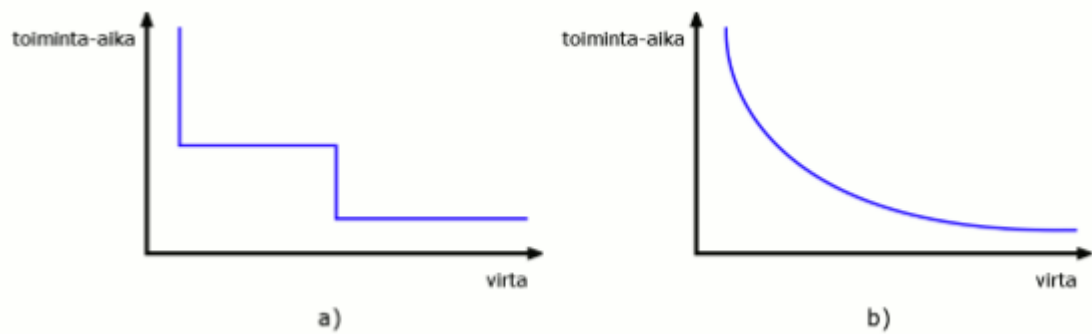
Numeeriset releet ovat digitaalitekniikkansa ansiosta hyvin joustavia. Ohjelmistoon perustuva toiminnallisuus sallii releen mukautumisen erilaisiin käyttötarkoituksiin suhteellisen helposti, ja sama laite voi suorittaa useita eri suojaustoimintoja. Tällainen mukautuvuus tuo mukanaan myös heikkouksia, sillä suuri parametrien määrä kasvattaa ohjelmistopohjaisten virheiden todennäköisyyttä. Useaan eri toimintoon kykenevät releet sisältävät hyvin monimutkaisen ohjelmiston, jossa saattaa olla valtava määrä asetteluparametreja. Näistä parametreista vain murto-osaa tarvitaan normaalissa käytössä, mikä tekee niiden asettelusta epähavainnollisempaa kuin vanhemmissa reletyypeissä. (Mörsky, 1993) (ABB, 2016)

4.2.1 Ylivirtasuojaus

Ylivirtarele on releistä yleisin ja niitä on kolmea eri tyyppiä: hetkellinen, vakioaika- ja käänteisaikaylivirtarele. Näiden tyyppien keskeisimpinä eroina on toiminta-aika ja siihen liittyvä laukaisun aikahidastus.

Hetkellinen ylivirtarele toimii nimensä mukaisesti välittömästi, eli releessä ei ole minikäänlaista laukaisun aikahidastusta. Releen mitatessa asetteluarvon ylittävän virran, se antaa heti laukaisukäskyn katkaisijalle. Tällaisia releitä käytetään yleensä suurivirtaisten lähioikosulkujen mahdollisimman nopeaan laukaisuun. (DEE-24116, 2015) (DEE-23040, 2015) (Paavola, 1970)

Vakioaikaylivirtareleet toimivat portaattaisesti, mikä tarkoittaa sitä, että useimmat tällaiset releet sisältävät kaksi tai kolme toimintaporrasta erisuuruksille virroille. Kun virta ylittää alemman asetteluarvon, rele toimii hitaamman portaan laukaisuviiveen mukaan. Jos taas virta ylittää ylemmän portaan, rele toimii nopeamman aikaportaan mukaan ja laukaisu tapahtuu huomattavasti nopeammin. Portaattaisella toiminnalla on mahdollista toteuttaa selektiivinen suojaus, jossa erilaisilla vioilla on eri pituiset laukaisuaikat. Kuvan 4.1 kuvaajasta a) nähdään releen toimintakäyrä. Ylempi porras tarkoittaa yleensä välitöntä tai lähes välitöntä laukaisua ja sitä nimitetäänkin pikalaukauksiksi.



Kuva 4.1. Ylivirtasuojauksen toimintatyypit (Elovaara, 1993)

Käänteisylivirtareleen toimintaa voidaan verrata sulakkeen toimintaan. Rele tunnistaa virran asetteluarvon ylityksen ja laukaisuviive on sitä pienempi, mitä suurempi ylitys on. Tämän ansiosta käänteisylivirtarele sallii selektiivisen suojauksen myös sellaisissa verkoissa, joissa käytetään sulakesuojauksia. Mutta koska suur- ja keskijänniteverkoissa ei Suomessa käytetä sulakkeita, käänteisylivirtareleitä käytetään suhteellisen vähän. Kuvassa 5 kuvaajassa b) on esitetty käänteisylivirtareleen toimintakäyrä. Käyrät eivät ole aina vakioita, vaan valittavana on eri jyrkkyyksiä ja muotoisia käyriä. (Elovaara, 1993)

Kun sijoitellaan ylivirtareleitä verkkoon, tulee tietää suojattavassa verkon osassa esiintyvät suurimmat ja pienimmät mahdolliset oikosulkuvirrat. Numeeriset releet kykenevät rekisteröimään vikavirran arvoja ja releiden mittaamalla vikavirran suuruudella voidaan laskea myös vikapaikan sijainti. Ylivirtasuojauksessa käytetään Suomessa pääasiassa hetkellis- ja vakioaikaylivirtareleitä. Releiden asetteluarvot ovat yleensä huomattavasti nimelliskuormitusvirtaa suurempia, jotta välttyttäisiin turhilta laukaisuilta, joita voi aiheutua esimerkiksi kytkentätilanteiden aikaansaamista lyhytkestoisista ylivirroista. Releitä voidaan käyttää suuntaamattomina ja suunnattuina. Suuntaamaton rele ei tarkkaile vikavirran suuntaa vaan pelkkää suuruutta. Suunnattu rele taas huomioi vikavirran kulkusuunnan ja se voidaan asettaa toimimaan vain tiettyyn suuntaan kulkevan vikavirran syntyessä. Rele käyttää suunnan tunnistamiseen jännitettä, jonka arvo tuodaan mittauslaitteelta. (Paavola, 1970) (Mörsky, 1993)

4.2.2 Maasulkusuojaus

Maasulkusuojauksen toteutusta suunniteltaessa on otettava huomioon verkon rakenne, tähtipisteen maadoitus ja maasulkuvirran suuruus, sillä se vaihtelee suuresti verkon maadoituksen mukaan. Tehollisesti maadoitettu verkko synnyttää maasulun aikana yleensä hyvin suuren maasulkuvirran, joka voidaan havaita jopa ylivirtareleillä. Maasta erotettu, sammutettu ja suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko sen sijaan tarvitsee erillisen relesuojauksen puhtaasti maasulkuvirtojen tarkkailuun. Sähköturvallisuusmääräykset määrittelevät verkon maasulun vikaresistanssiksi 0-500 Ω ja

maasulkusuojauksen tulee havaita tällaiset viat. Lisäksi suositus on, että suojaus havaitsee myös suuremmat vikaresistanssit. (Fingrid, 2012) (Mörsky, 1993)

Maasulussa tähtipisteen ja maan välinen jännite eli nollajännite kohoaa, ja nousu voidaan huomata nollajännitettä mittaavan ylijännitereleen avulla. Releen avulla voidaan saada tieto suuriresistanssistakin maasuluista. Nollajännitteen mittaamiseen on kaksi tapaa: käytetään tähtipisteen ja maan välissä olevaa jännitemuuntajaa tai mitataan vaihejännitteet ja lasketaan niiden avulla nollajännite. Nollajänniterelettä käytetään yleensä vain varasuojana tai maasulun yleishälytyksen antajana, sillä nollajännitettä mittaamalla ei saada viallisesta johtolähdöstä tietoa. Sammutetuissa ja maasta erotetuissa verkoissa maasulku saa nollajännitteen kasvamaan kaikissa verkon osissa, jotka ovat galvaanisesti kytkettynä samaan verkkoon. Joten olipa rele millä tahansa etäisyydellä vikapaikasta, se havaitsee saman nollajännitteen.

Säteittäisen verkon selektiivinen maasulkusuojaus toteutetaan useimmiten suunnatuilla maasulkusuojuhareilla ja suojaus tapahtuu johtolähdöittäin. Releet mittaavat oman lähtönsä nollavirtaa ja saavat tiedon nollajänniteestä ja määrittävät näiden arvojen perusteella mahdollisen vikavirran suunnan. Nollavirta voidaan mitata joko virtamuuntajien summakytkennän tai kaapelivirtamuuntajan avulla. Vaihtoehtoisesti se voidaan laskea vaihevirroista. Toisinaan verkoissa käytetään myös suuntamaatonta maasulkusuojausta täydentämään ja nopeuttamaan suunnattua relesuojausta. Suuntaamatonta suojausta voidaan käyttää myös varmistamaan suojauksen toimintaa kaksoismaasulkutilanteissa. (DEE-24116, 2015) (DEE-23040, 2015) (Mörsky, 1993)

Maasulkusuojaus toteutetaan useimmiten portaittaisesti, jolloin suojauksen toimintanopeus määräytyy vikavirran suuruuden mukaisesti. Portaittaisessa suojauksessa toimintavaatimukset määritetään yleensä eri portaille, jolloin toimintanopeusvaatimus täyttyy nopealla portaalla ja herkkyysvaatimus suuren vikaresistanssin sisältävässä maasulussa hitaammalla portaalla. (Fingrid, 2012)

Toisinaan verkkoon saattaa syntyä jaksottaisia transienttimaasulkuvikoja. Nämä viat ovat kestoltaan tyypillisesti 0,1 millisekunnista yhteen millisekuntiin ja tavallinen selektiivinen maasulkurele ei voi niitä havaita. Vaikka vian kesto on hyvin lyhyt, se toistuu yleensä useita kertoja vaihejännitteen saavuttaessa huippuarvonsa. Jaksottaiset transienttimaasulkuviat johtuvat yleensä eristevaurioista ja niiden tunnistamista varten on releisiin suunniteltu oma toimintonsa. (Elovaara, 1993) (Paavola, 1970)

Tilanteessa, jossa vaihejohdin katkeaa, voi syntyneen maasulun vikavirta olla niin pieni, ettei maasulkusuojaus havaitse sitä poikkeamana. Tällaisia tilanteita varten maasulkusuojausta täydennetään useimmiten vaihekatkosuojalla, joka tarkkailee vaihevirtojen symmetriaa. (Mörsky, 1993) (DEE-24116, 2015) (Paavola, 1970)

4.2.3 Taajuusrele

Taajuusrele on nimensä mukaisesti verkon taajuutta tarkkaileva suojarle, joka reagoi taajuuden poiketessa releen asetteluarvoista kumpaan suuntaan tahansa. Sähköverkossa taajuuden vaihteluita aiheuttavat muun muassa kuormien irtikytkeä tai tahtikoneiden putoaminen verkosta. Taajuusreleet voivat reagoida myös taajuuden muutostenopeuteen. Tällaisia releitä käytetään lisäsuojana kuormien tai tuotannon irtikytkeä esimerkiksi verkon kytkeytyessä saarekkeeksi. (Mörsky, 1993) (Paavola, 1970)

Alitaajuusreleet tarkkailevat verkon tehotasapainoa taajuuden avulla, sillä tehonvajauksilanteessa verkon taajuus laskee. Tällöin alitaajuusreleet irrottavat johto-osuuksia verkosta kuorman vähentämiseksi ja tehotasapainon ylläpitämiseksi. (Mörsky, 1993)

4.2.4 Differentiaalisuojaus

Differentiaalireleet tarkkailevat nimensä mukaisesti virtojen eroja. Ne vertaavat suojauskohteeseen tulevien ja siitä lähtevien virtojen ominaisuuksia, kuten vaihekulmia ja itseisarvoja, ja mikäli vertailtavat arvot poikkeavat toisistaan asetteluarvoa enemmän, rele suorittaa laukaisun. Differentiaalireleitä käytetään myös suojaamaan kahta rinnakkaista kohdetta, jolloin ne vertaavat näiden kahden kohteen arvoja toisiinsa. Tällöin puhutaan poikittaisdifferentiaalisuojasta. Tavallisimpia suojauskohteita differentiaali- eli vertoreleille ovat generaattorit, muuntajat, kiskostot sekä johdot. Kun releitä käytetään johtojen suojaukseen, tarvitaan johtojen päiden välille viestiyhteys, joka useimmiten toteutetaan joko radiolinkillä, kantoaaltoyhteydellä tai valokuidulla. Suojauksen toimivuus perustuu täysin viestiyhteyden toimivuuteen, joten sen kuntoa on valvottava tarkasti. (Mörsky, 1993) (DEE-24116, 2015)

Differentiaalireleiden suojausalue muodostuu virtamuuntajien välisestä osasta ja toimii vain näiden väliin jäävällä alueella. Tällaista suojausta kutsutaan absoluuttisen selektiiviseksi suojaukseksi ja sen etuna on hyvin nopea toiminta sekä herkkyys. Releiden laukaisuaikat voivat olla jopa alle yhden puolijakson vian alkuhetkestä ja suojaus voi toimia jopa vikavirran poiketessa nimellisvirrasta vain muutaman prosentin. (ABB, 2016)

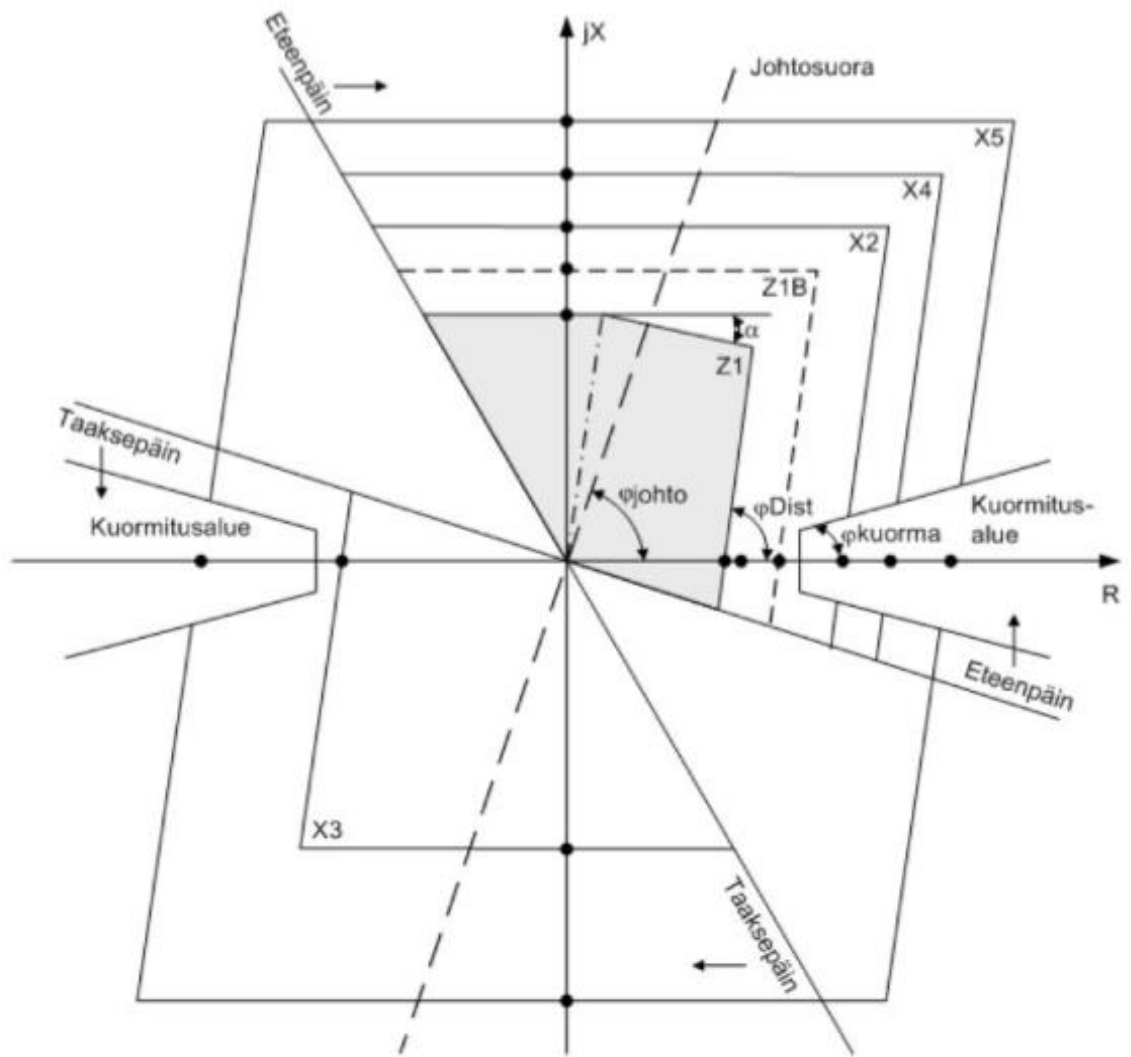
Differentiaalirele on suojalaitteena hyvin tarkka ja nopeatoiminen laite, mutta suojauslaitteen tarkkuus riippuu todella paljon virtamuuntajista ja niiden antamista mittausloksista. Tästä syystä differentiaalisuojauksen suunnittelussa tulee kiinnittää paljon huomiota virtamuuntajien valintaan, sillä mittausvirheet aiheuttavat suojaustarkkuuden huonontumista. Lisäksi releen asetteluarvoja määritettäessä tulee ottaa huomioon kytkentäryhmän aiheuttama vaihesiirto, käämikytkimen vaikutus, kytkentäsysäysvirta

sekä tyhjäkäyntivirta. Asetteluarvoja määritettäessä perussääntönä on, että mitä suurempi itse kuormitusvirta on, sitä suurempi virtojen poikkeama sallitaan. (ABB, 2016)

4.2.5 Distanssirele

Distanssireleen toiminta perustuu vaihevirtojen ja -jännitteiden mittaukseen. Rele laskee vaihevirran ja -jännitteen perusteella impedanssin ja vertaa sitä asetteluarvoonsa. Mikäli impedanssi alittaa releen asetteluarvon, rele suorittaa laukaisun määrättyllä viiveellä tai heti, riippuen mitatun arvon ja asetteluarvon välisen poikkeaman suuruudesta. Vian aikainen impedanssi on aina pienempi lähempänä vikapaikkaa, jolloin poikkeama asetteluarvoon on suurempi. Distanssirele pystyy tekniikkansa ansiosta tunnistamaan vian etäisyyden ja toimimaan sen mukaan, kuinka kaukana releestä vikapaikka sijaitsee. Distanssireleitä käytetään pääasiassa kantaverkon ja alueverkon silmukoitujen osien suojaukseen, sillä ne voivat toimia erittäin selektiivisesti myös silmukoidussa verkossa. (Mörsky, 1993) (DEE-24116, 2015)

Distanssireleen toiminta on portaittaista. Releen laukaisuviive muuttuu vianaikaisen impedanssin suuruuden mukaan, eli pieni-impedanssiset viat laukaistaan ilman viivettä ja viive kasvaa impedanssin kasvaessa. Portaittaisen toiminnan ansiosta rele toimii selektiivisesti. Distanssireleen suojausportaita kutsutaan vyöhykkeiksi ja jokaiselle vyöhykkeelle on määritelty oma asetteluarvo ja sille sopiva viive. Jokainen vyöhyke voidaan uusimmissa releissä määritellä erikseen suunnatuiksi tai suuntaamattomiksi, jolloin suunnattu vyöhyke havaitsee vain suojareleen tietyllä puolella olevia viakoja ja suuntaamaton tunnistaa kaikista suunnista nähtävät viat. Kuvassa 4.2 on esitetty distanssireleen vyöhykkeistä periaatekuva. (ABB, 2016)



Kuva 4.2. Distanssireleen suojausvyöhykkeiden periaatekuva (Siemens, 2016)

Koordinaatistossa esitetty johtosuora kuvaa johdon impedanssia ja kulma φ kuvaa impedanssin kulmaa. Koordinaatistoon piirretyt alueet (Z1, Z1B, X2 jne.) tarkoittavat distanssireleen laukaisuvyöhykkeitä, joiden mukaan rele suorittaa joko pikalaukaisun tai määriteltyä toimintaviivettä seuraavan laukaisun. Kun tapahtuu vikaresistanssiton oikosulku, releen ja vikapaikan välinen impedanssi sijoitetaan kyseiselle suoralle. Mikäli oikosulku tapahtuu lähellä relettä eli vyöhykkeellä Z1, rele suorittaa pikalaukaisun. Kauempana tapahtuva vika tarkoittaa impedanssin sijoittumista suuremmalle vyöhykkeelle, jolloin rele suorittaa laukaisun toimintaviiveen jälkeen. Toisinaan vian yhteydessä voi esiintyä vikavastus, joka summautuu johdon impedanssiin. Vikaresistanssin muodostumiselle voi olla useita syitä, kuten esimerkiksi valokaarivastus. Vikavastus huomioidaan kuvan 4.2 mukaisten vyöhykkeiden leveydessä, joiden reservialue auttaa relettä toimimaan oikealla vyöhykkeellä vikavastuksesta huolimatta. Kuvassa esitettyjen kulmien φ_{Dist} ja α tarkoitus on ehkäistä vikavastuksen aiheuttamaa vir-

hettä. Kulma φ_{Dist} tulee asetella niin, että se vastaa johdon impedanssin kulmaa. Tällöin releen resistanssiulottumaan lisätään johdon resistanssi. Kulma \propto taas ehkäisee asettelullaan vikaresistanssin aiheuttamaa yliulottumaa. Releiden vyöhykkeiden muodot riippuvat itsereleestä, ja verratessaan mitattuja arvoja aseteltuihin vyöhykkeisiin, releet laskevat impedanssin itseisarvon, eivätkä erikseen resistanssia ja reaktanssia. Vikaresistanssi voi siis helposti siirtää vian tarkoitettua vyöhykettä kauemmas. Normaalisissa käyttötilanteissa releen mittamaan impedanssi sijoittuu kuvassa lähelle $R_{akselia}$, mutta kauas origosta, sillä normaali kuormitus tilanne tarkoittaa yleensä lähes täysin resistiivistä virtaa. (Siemens, 2016)

Distanssireleiden vyöhykkeiden asettelu tapahtuu yleensä niin, että ensimmäinen vyöhyke kattaa 85 % suojattavan johdon pituudesta. Tällöin rele suorittaa pikalaukaisun, mittamuuntajien, releen tai johdon impedanssitietojen epätarkkuuksista huolimatta. Releen toinen vyöhyke asetellaan kattamaan yleensä 50-80% vasta-asemalta lähtevästä johdosta ja sen toiminta-aika on yleensä 0,2-0,4 sekuntia. Releen kolmas vyöhyke sekä seuraavat vyöhykkeet voivat ulottua hyvin pitkälle. Niiden toimintaviive on yleensä pidempi ja ne toimivat joko suuntaamattomina tai taaksepäin suunnattuina. Vyöhykkeiden tarkoituksena on toimia varasuojina verkon muille releille. Vyöhykkeisiin perustuvan suojauksensa ansiosta distanssirele tarjoaa luotettavan varasuojan monille johto-osuuksille ja oikosulkuvirran muutoksilla ei ole sen toiminta-arvoihin vaikutusta. Tämä tarjoaa merkittävän edun suhteessa tavalliseen vakioaika ylivirtareleeseen (Mörsky, 1993) (ABB, 2016)

Distanssireleiden ensimmäiset eli pikalaukaisun alueet kattavat johto-osuudesta 85% kummastakin päästä, näin ollen johdon kumpaankin päähän jää 15 % johtopituus, jossa toinen releistä toimii viivästetyllä- ja toinen pikalaukaisulla. 70% johdon pituudesta on siten suojattu pikalaukaisulla johdon kummastakin päästä. Haittana tällaisessa järjestelyssä on, että toisen releen toimiessa pikalaukaisulla ja toisen viivästettynä, ne saattavat häiritä jälleenkytkentöjä. (Mörsky, 1993)

Distanssireleen toiminta ei vaadi viestiyhteyttä, mutta esimerkiksi sallivaan yliulottuvaan toimintoon perustuva yhteys auttaa suojausta toimimaan koko suojattavan johdon pituudelta. Suojauslogiikka on käytetyistä teknologioista yleisimpiä ja sen toiminta perustuu vapautussignaaliin, jonka rele lähettää vastapään releelle havaittuaan vian Z1B-vyöhykkeellä. Kyseinen vyöhyke ulottuu 120% suojattavasta johtopituudesta. Viestiyhteyden käyttö ei kuitenkaan sulje pois releen normaalia vyöhykesuojausta, ja se havaitsee ja laukaisee muissa vyöhykkeissä ilmenneet viat viestiyhteydestä välittämättä. Näin ollen viestiyhteyden vioittuessa, releen toiminta ainoastaan hidastuu joissain tapauksissa. Riippumattomuus viestiyhteydestä antaa distanssireleille merkittävän edun suhteessa differentiaalireleisiin, jotka tarvitsevat jatkuvaa viestiyhteyttä. (Mörsky, 1993) (ABB, 2016)

Distanssisuojaus ei kuitenkaan ole ongelmaton, sillä selektiivisen suojauksen toteuttaminen luotettavasti asettaa rajoituksia johto-osuuksien muuntajille ja T-haarojohtojen pituuksille. Distanssisuojaus vaatii hyvin suuren reaktanssin muuntajilta, sillä pienellä reaktanssilla distanssirele havaitsee muuntajan alajännitepuolen viat ja suorittaa tarpeettoman laukaisun. Haarojohtojen tapauksessa niiltä syötettävä puolestaan teho vääristää releen mittamaa impedanssia. Tämä on huomioitava vyöhykkeiden asettelussa, sillä rele saattaa nähdä vian väärässä vyöhykkeessä kuin missä se todellisuudessa on. Distanssireleet eivät toimi luotettavasti erittäin lyhyillä johto-osuuksilla, sillä jännitteen putoaminen lähelle nollaa lähellä relettä voi häiritä sen toimintaa (Siemens, 2016). (Mörsky, 1993)

Distanssireleen toimintaan saattaa olennaisesti vaikuttaa verkossa esiintyvät heilahtelut. Nämä heilahtelut voivat syntyä voimakkaiden kuormitusmuutosten, jälleenkytkentöjen, oikosulkujen ja verkon kytkentöjen vaikuttaessa generaattoreihin. Distanssirele näkee korkeat virrat ja matalat jännitteet vian kaltaisena matalana impedanssina ja suorittaa tarpeettoman laukaisun. Heilahtelun aiheuttamia tarpeettomia laukaisuja voidaan estää heilahtelusalpatoiminnolla. Tämä toiminto perustuu impedanssin muutosnopeuden tarkkailuun, sillä oikosulkutilanteessa impedanssi laskee hyvin nopeasti, kun taas tehonheilahtelussa muutos on huomattavasti hitaampaa. Lisäksi heilahtelu on aina symmetrinen kolmivaiheinen ilmiö. Heilahtelun tunnistusta käytetään myös erotamaan verkon osia voimakkaiden ja laantumattomien heilahteluiden aikana, millä taataan verkon toimintavarmuus. (Mörsky, 1993)

4.2.6 Kiskosuojaus

Sähköasemilla olevat kiskostot ovat sähkönsiirron solmupisteitä ja kiskosto-oikosulun aiheuttamat haitat ovat erityisen haitallisia. Kiskoja syötetään useasta suunnasta ja siirrettävät tehot saattavat nousta hyvinkin korkeiksi. Tämän seurauksena oikosulkujen aiheuttamat vikavirrat saattavat kohota todella suureksi ja aiheuttaa pahoja rakenteellisia vaurioita. Vaikka kiskoviat ovat hyvin harvinaisia, nykystandardien ja suojaustekniikan kehittymisen myötä on myös kiskosuojaus yleisessä käytössä. (Mörsky, 1993)

Perinteisesti nopea kiskosuojaus toteutetaan differentiaalireleillä, jotka tarkkailevat kiskojen virtojen summia. Kiskoon tulevien ja siitä lähtevien virtojen summan tulisi olla aina nolla. Mikäli arvo poikkeaa nollasta, kiskosuoja havaitsee sen ja laukaisee kerralla kaikki vialliseen kiskoon liitetyt katkaisijat. Tällaisen ratkaisun toteutusta vaikeuttaa esimerkiksi kytkinlaitoksilla erilaiset kytkentätilanteet, joihin suojaus saattaa reagoida turhaan. Uusimmissa kiskosuojaussovelluksissa järjestelmät huomioivat lisäksi muun muassa virtojen suuntia, suuruuksia sekä kytkentätilanteita, ja pystyvät

näiden tietojen perusteella rajaamaan pois turhat laukaisut. Uusimmat suojausjärjestelmät perustuvat edelleen differentiaalisuojaukseen, mutta digitaalitekniikan lisääntyminen sallii kiskon kokonaisvaltaisemman seurannan ja nopean toiminnan. Suojaus voidaan toteuttaa joko keskitettynä eli sijoittamalla itsenäinen järjestelmä yhdelle asemalle tai hajautettuna, jolloin sijoitetaan kenttäyksiköitä sähköasemille ja ne yhdistetään keskusyksikköön. (ABB, 2016) (Siemens, 2016)

4.3 JAKELUVERKON SUOJAUKSEN SUUNNITTELU

4.3.1 Oikosulkusuojauksen suunnittelu

Verkkoa suunniteltaessa tulee varmistua sen oikosulkusuojauksesta. Tämä varmistamiseksi verkon tulee täyttää kolme kriteeriä: oikosulkukestoisuus, selektiivisyys ja havaitsevaisuus. Oikosulkukestoisuudella tarkoitetaan, sitä kuinka kauan verkko kestää oikosulusta aiheutuvaa nopeaa lämpötilan nousua. Tämän laskemiseksi on muodostettu laskentamenetelmä, joka huomioi verkon johtimien jäähtymisnopeuden, verkon poiskytkentäviiveet, sekä pika- että aikajälleenkytkennän keston. Kaavassa 4.1 on esitetty laskentamenetelmän ensimmäinen vaihe, jonka tuloksena saadaan johdon halutulle oikosulun kestolle suurin vikavirta, jolla johto ei vaurioidu. (Lakervi E., 1998)

$$I_k = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}} \quad (4.1)$$

missä

I_{k1s}	johdon valmistajan ilmoittama suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta
t	oikosulun kesto aika

Johdon oikosulkukestoisuutta tulee kuitenkin tarkastella myös jälleenkytkentöjen kannalta. Tässä yhteydessä käytetään termiä oikosulun ekvivalenttinen kesto aika t_{ekv} . Ekvivalenttinen kesto aika ottaa huomioon kaapelin lämpenemisen ja jäähtymisen sen käydessä läpi pika- ja aikajälleenkytkennän. Mikäli vika ei korjaudu jälleenkytkennöillä, kaapeli jatkaa lämpenemistä jälleenkytkentöjen välillä. Kaavassa 4.2 on esitetty ekvivalenttisen kestoajan laskenta

$$t_{ekv} = t_1 * e^{-\frac{t_0}{\tau}} + t_2 \quad (4.2)$$

missä

t_1	oikosulun kesto aika ennen aikajälleenkytkentää
t_0	aikajälleenkytkennän jännitteetön aika
τ	johtimen jäähtymisvakio

t_2 oikosulun kesto aika aikajälleenkytkennän jälkeen

Kaavasta 4.2 saatu kesto aika voidaan puolestaan sijoittaa kaavaan 4.1, jolla voidaan laskea kaapelin maksimivirta kyseiselle ajalle. Mikäli tulos on pienempi kuin lähdön suurin mahdollinen oikosulkuvirta, on lähtö oikosulkukestoton. (Partanen & Lakervi, 2012)

Selektiivisyydellä puolestaan tarkoitetaan lähdön kykyä erottaa vikavirrat kuormitusvirroista. Verkossa virta saattaa nousta suurten kuormituspiikkien aikana hyvin lähelle pienintä mahdollista oikosulkuvirtaa, mutta releiden asettelut ja verkko on mitoitettava niin, ettei suojaus reagoi kulutuspiikkeihin. (Partanen & Lakervi, 2012)

Verkkoa suojaamassa on yleensä kaksi eri laukaisumekanismia: pikalaukaisu ja aikalaukaisu. Pikalaukaisun tehtävä on pääasiassa reagoida nopeasti suuriin vikavirtoihin. Vikavirrat ovat suurempia lähellä vikapaikkaa, joten pikalaukaisu reagoi nopeasti johtolähdön alussa tapahtuviin vikoihin, jotka saattaisivat aiheuttaa vakavia vaurioita ja syviä jännitekuoppia suurelle määrälle asiakkaita. Aikalaukaisun tehtävä on suojata koko verkkoa. Sen asettelu arvo on määritetty korkeammaksi kuin suurin kuormitus, mutta silti pienemmäksi kuin pienin mahdollinen oikosulkuvirta. Aikalaukaisun toimintaviive on mitoitettu niin, että suojaus toimii selektiivisesti, mutta silti aiheuttamatta johtovaurioita.

Kolmas oikosulkusuojauksen kriteeri on jo mainittu verkon reagointi myös hyvin pieniin vikavirtoihin. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on pienin mahdollinen oikosulkuvirta ja suojauksen tulisi pystyä havaitsemaan ja reagoimaan vian tapahtumiseen. (Paavola, 1970) (Partanen & Lakervi, 2012)

4.3.2 Maasulkusuojauksen suunnittelu

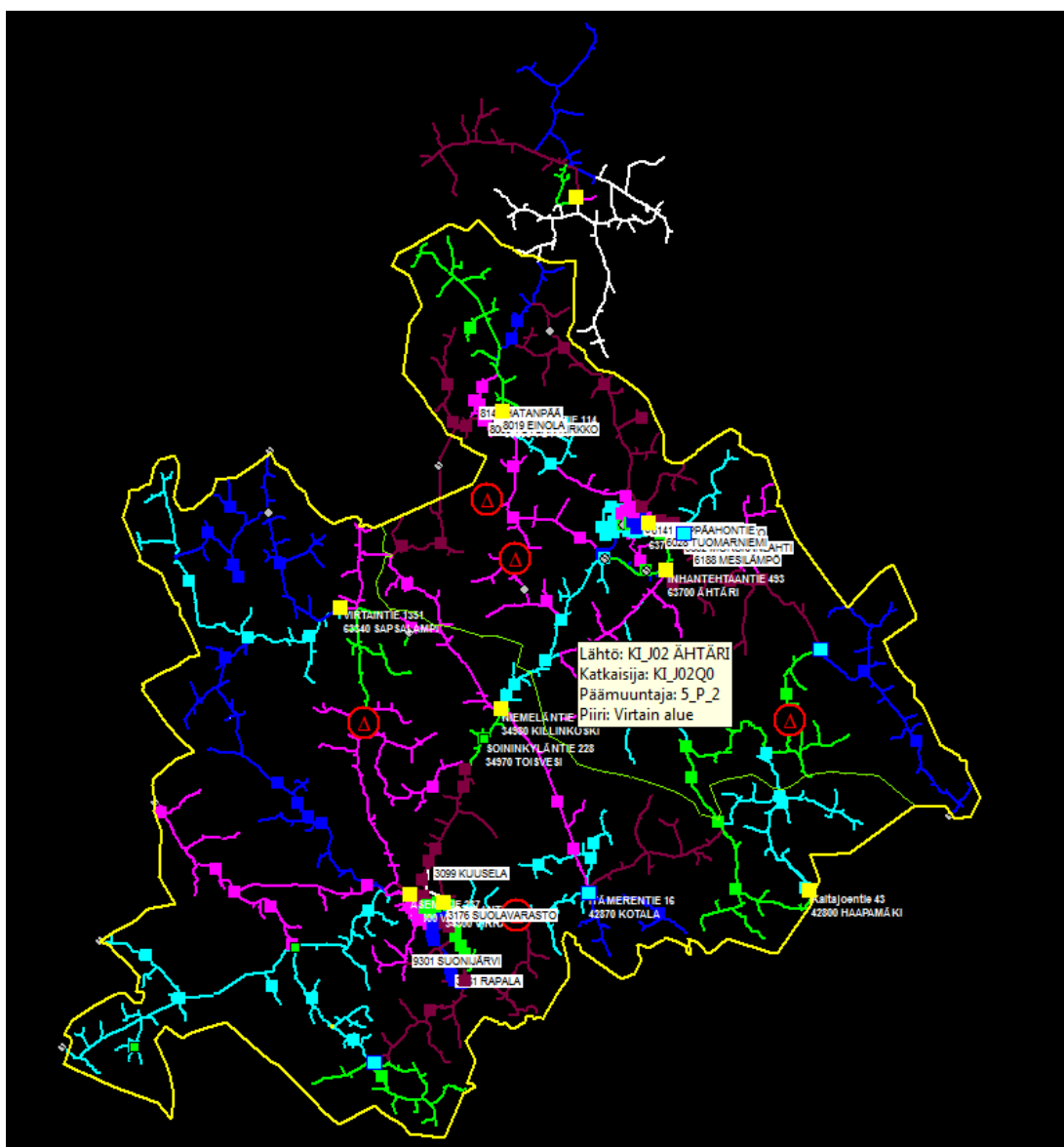
Maasulkusuojauksen toiminnan selektiivisyys perustuu aikaportaisiin, sillä vian sijainti ei vaikuta maasulkuvirran suuruuteen. Suunniteltaessa tärkeimmät käsiteltävät suureet ovat pienimmät nollavirrat, kun syötettävä galvaanisesti yhteen kytketty verkko on hyvin pieni ja pienimmät tähtipistejännitteet syötettävän verkon ollessa laaja. Näiden arvojen perusteella maasulkusuojaus saadaan toimimaan oikein. Sähköturvallisuuslain kannalta taas tärkeimmät suureet liittyvät kosketusjänniteisiin. Sen mukaan säädettyjen maadoitusvaatimusten kannalta tärkeimpiä ovat suurimmat maasulkuvirrat sekä maasulun kestoajat. Sähköturvallisuuslain mukaan verkon maasulkusuojauksen tulisi toimia vioissa, joiden vikaresistanssi on alle 500 ohmia. (Partanen & Lakervi, 2012)

5. KOILLIS-SATAKUNNAN SÄHKÖVERKON SUOJAUSTARKASTELU

5.1 Verkon rakenne

Kuten jo aiemmissa luvuissa mainittiin, on Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n sähköverkko käytännössä poikkeuksetta säteittäinen, eikä se sisällä keskijännitelähtiin kytkettyjä hajautettuja sähkön tuotantoyksiköitä.

Kuvassa 5.1 on esitetty tarkasteltava verkko kokonaisuudessaan. Kuvassa olevat värit kuvaavat verkon kytkentätilaa lähdeittäin.



Kuva 6.1. KSAT sähköverkko

KSAT:n sähköverkko koostuu pääasiassa avojohdoista. Taajama-alueilla verkko on pääosin kaapeloitu ja joitakin osia verkosta on toteutettu päällystetyllä ilmajohdolla.

5.2 Käytöntukijärjestelmä DMS600

Tässä työssä tehtävä verkon suojaustarkastelu on käsin laskentaa lukuun ottamatta toteutettu ABB:n DMS600 ohjelmistolla. DMS ohjelmistoa käytetään KSAT:lla verkon nykytilan tarkkailuun, kytkentätilojen muutoksiin sekä vikatilanteiden hallintaan.

DMS ohjelmisto on hyvin monipuolinen verkkotyökalu, jota voidaan käyttää verkon suunnitteluun sekä verkon nykytilan tarkkailuun ja muutosten tekemiseen. Ohjelmisto on yhdistetty käytönvalvontajärjestelmä SCADA:aan, jolloin sen kautta voidaan hallita myös verkon automaatiota. SCADA kerää verkon automaatiolta tietoa verkon tapahtumista ja tallentaa ne DMS600-ohjelmiston tietokantaan. Ohjelmiston perusominaisuuksiin kuuluu verkon oikosulku- ja maasulkuvirtojen laskenta eri verkon kohdissa. DMS:n kautta voidaan myös tarkastella verkon reletietoja, suojauksen selektiivisyyttä, verkon vikakestoisuutta sekä löytää toimintavarmuuden kannalta heikot kohdat verkosta.

DMS600:lla on oma verkkotietojärjestelmä, johon on tallennettu kaikki verkkoa koskevat tiedot. DMS ohjelmisto hakee toimiessaan jatkuvasti tietoja verkkotietojärjestelmästä, joka toimii serverin tyyppisenä tietokantana. DMS600 SA on työkalu, joka toimii linkkinä verkkotietokannan ja SCADA-sovelluksen välillä. Ohjelmistoon kuuluvat myös aiemmin mainittu verkon suunnitteluohjelma, joka on nimeltään DMS600 NE, sekä käytöntukijärjestelmä, joka puolestaan on DMS6000 WS. WS:ä käytetään pääasiassa verkon valvontaan ja sen avulla voidaan tarkkailla hyvin yksityiskohtaisesti verkon tapahtumia reaaliaikaisesti. WS:n avulla voidaan myös helposti muuttaa verkon kytkentätilaa. Vian sattuessa WS laskee tarkan vikapaikan verkon vikavirtojen avulla. DMS600 NE ohjelmaa käytetään koko DMS:n verkkotietojen hallintaan. (ABB, Micorscada Pro DMS600 4.4 FP1 Operation manual, 2012)

5.3 Sähköaseman oiko- ja maasulkutarkastelu

Tässä kappaleessa on tarkoitus tarkastella kahden sähköaseman vikavirtoja ja verrata niitä nykyisiin releasetteluihin sekä käytöntukijärjestelmän laskemiin vikavirran arvoihin. Kahden sähköaseman vikavirtatarkastelu tehtiin manuaalisesti käsin laske-
malla ja saatuja oikosulku- ja maasulkuvirtoja verrattiin kyseisen sähköaseman releasetteluihin sekä ohjelmiston laskemiin arvoihin. Toinen tarkasteltavista sähköasemista oli liitetty 45 kV syöttöön ja toinen 110 kV syöttöön, joten samalla voitiin verrata

poikkeavatko käytöntukijärjestelmän laskemat vikavirran arvot eri jännitetasossa enemmän.

Ensimmäisenä tarkasteltiin Ritarin sähköasemaa, jonka päämuuntaja on 45/21 kV ja teho 10 MVA. Ritarin sähköaseman oikosulkutarkastelussa laskettiin aseman jokaisen lähdön pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta, eli sähköisesti etäisimmän mahdollisen vikapaikan kaksivaiheinen oikosulkuvirta. Taulukossa 5.1 nähdään kaavan 2.1 kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta laskettu kaksivaiheinen oikosulkuvirta Ritarin sähköaseman jokaiselle lähdölle, sekä käytöntukijärjestelmän laskemat vastaavat arvot. Kuten, huomataan, arvot ovat hyvin lähellä toisiaan ja erot johtuvat todennäköisesti käsin laskennan likiarvoisuudesta.

Taulukko 5.1. Ritarin sähköaseman kaksivaiheiset oikosulkuvirrat. käsin lasketut sekä käytöntukijärjestelmästä saadut oikosulkuvirranarvot

Lähtö	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} (kA)	Käytöntukijärjestelmän oikosulkuvirta I_{k2} (kA)
HEINÄÄHO	0,54	0,49
SULKAVA	0,28	0,26
KILLINKOSKI	0,27	0,30
KONTIAINEN	0,32	0,30

Taulukossa 5.2 on myös esitetty jokaisen lähdön ylivirtasuojauksen releasettelut sekä laukaisuviivet portaittain. Verrattaessa oikosulkuvirtoihin huomataan, että lasketut vikavirtojen arvot sijoittuvat kaikilla lähdöillä ensimmäisen ja toisen portaan väliin, mutta suojauksen aikalaukaisuporras on hyvin pieni verrattuna pienimpien oikosulkuvirtojen arvoon. (KSAT, 2016)

Taulukko 5.2. Ritarin sähköaseman ylivirtasuojauksen asettelut (KSAT, 2016)

	Heinäaho	Sulkava	Killinkoski	Konttiainen
Aikalaukaisu (A)	70	50	80	50
Pikalaukaisu (A)	600	600	600	600
Laukaisuviive aikalaukaisu/pikalaukaisu (ms)	400/90	400/90	400/90	400/90

Pienimmän oikosulkuvirran lisäksi tulee laskea myös aseman suurin mahdollinen oikosulkuvirta. Tämä tarkoittaa kolmivaiheista oikosulkua hyvin lähellä sähköasemaa. Kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskentaan käytetään kaavaa 2.1. Laskennassa oletettiin kolmivaiheisen oikosulun tapahtuvan aivan sähköaseman edessä, joten johdon impedanssin vaikutus on jätetty huomioimatta. Kun oikosulku tapahtuu hyvin lähellä säh-

köasemaan, siihen vaikuttavat tekijät ovat ainoastaan syöttävän verkko sekä päämuuntaja, joten käsin laskettu arvo jokaisella lähdöllä suurimmalle mahdolliselle oikosulkuvirralla I_{k3} on tässä tapauksessa 1,03 kA. Käytöntukijärjestelmä ilmoittaa vastavaksi arvoksi 1,19 kA. Näistä arvoista halutaan tietää vain se, että ne ylittävät releiden pikalaukaisuasetteluun, ja kuten taulukosta 5.2 voidaan nähdä, ehto toteutuu. (KSAT, 2016)

Oikosulkutarkastelua varten tulee laskea myös verkon suurimmat kuormitusvirrat, jotta releiden laukaisu ei tapahdu pelkästään verkon normaalilla käytöllä kuormituksen noustessa hetkellisesti. Taulukossa 5.3 on esitetty Ritarin aseman kuormitusvirrat lähdöittäin huippukuormitustilanteessa.

Taulukko 5.3. Kuormitusvirrat

Lähtö	Teho S(MVA)	Kuormitusvirta I(A)
HEINÄÄHO	0,65	18
SULKAVA	0,55	15
KILLINKOSKI	0,43	12
KONTIAINEN	0,83	23

Verrattaessa taulukon 5.3 arvoja taulukossa 5.2 esitettyihin releiden asetteluarvoihin, voidaan huomata, että kuormitusvirrat jäävät selvästi asetteluarvoja pienemmäksi, joten toimivan oikosulkusuojauksen ehdot täyttyvät asemalla tältä osin.

Ritarin sähköasemalle tehtiin myös maasulkutarkastelu, jossa laskettiin jokaiselle lähdölle maasulkuvirta kahdessa eri tapauksessa. Ensimmäisessä tapauksessa oletettiin vian olevan vastukseton, jolloin vikaresistanssi saa arvon nolla. Toisessa tapauksessa oletettiin vikaresistanssin saavan jonkin arvon ja arvoksi valittiin 500 ohmia. Aseman maasulkuvirran arvot ensimmäisessä ja toisessa tapauksessa sekä käytöntukijärjestelmän antamat vikavirtojen arvot on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Maasulkuvirrat vikavastuksella ja ilman

Maasulkuvirta	Lasketut (A)	DMS (A)
0 ohm	13,7	11,1
500 ohm	11,9	10,0

Laskennassa käytettiin kaavaa 2.10, jotta voitiin huomioida 500 ohmin vikaresistanssi. ilman vikaresistanssia tapahtuva tarkastelu olisi ollut mahdollista laskea kaavalla 2.10, mutta 2.14 antaa hieman tarkempia tuloksia. Releen tunnistamat maasulkuvirrat voidaan nähdä taulukosta 5.5.

Taulukko 5.5. Releen tunnistamat maasulkuvirran arvot

Lähdöt	Releen tunnistama vastukseton maasulkuvirta (A)	Releen tunnistama 500 ohmin vastuksellinen maasulkuvirta (A)
HEINÄÄHO	12,0	10,4
SULKAVA	10,2	8,9
KILLINKOSKI	9,7	8,4
KONTIAINEN	9,2	8,0

Jotta voitaisiin laskea kaikkein pahimman tilanteen vikavirta, tulee tietää millä lähdöllä on pienimmät maakapasitanssit. Pahin tilanne tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että maasulku tapahtuu lähdöllä Killinkoski ja sen kanssa samaan aikaan kytkettynä on pelkästään lähtö Heinäaho. Jokaisen lähdön maakapasitanssi on esitetty taulukossa 5.6.

Taulukko 5.6. Maakapasitanssit lähdöittäin

Lähdöt	Maakapasitanssi/vaihe(nF)
HEINÄÄHO	151,2
SULKAVA	306,0
KILLINKOSKI	352,0
KONTIAINEN	390,0

Kaikkein epäedullisimmassa tapauksessa lähdöistä olisi kytkettynä vain Heinäaho sekä Sulkava. Tällöin alueen maakapasitanssi C olisi 502,8 nF. Tästä voidaan edelleen laskea releiden tuntemaan vikavirran suuruus kaavalla 2.14. Taulukossa 5.7 on esitetty Ritarin asemalle lasketut maasulkusuojauksen asetteluarvot pahimmassa tapauksessa, eli kun vain kaksi lähtöä on kytkettynä, joista toinen on aina Heinäaho.

Taulukko 5.7. Releiden lasketut raja-arvot asetteluille lähdöittäin

Lähdöt	Johdon laskettu raja-arvo asetteluille (A)
HEINÄÄHO	1,76
SULKAVA	3,25
KILLINKOSKI	3,72
KONTIAINEN	4,11

Vikavirtojen lisäksi maasulkua varten tulee laskea myös nollajännite, jonka selvittämiseksi voidaan käyttää kaavaa 2.12. Nollajännite on pienimmillään, kun kaikki lähdöt ovat kytkettyinä ja sen arvoksi saadaan tällöin $U_0 = 10,52 \text{ kV}$. Nollajännitteen arvo laskettiin vikaresistanssin arvolla 500Ω .

Taulukossa 5.8 on esitetty käytöntukijärjestelmästä saadut maasulkusuojauksen asetteluarvot.

Taulukko 5.8. Ritarin sähköaseman todelliset virta-asettelut

Lähdöt	1.porras (A)	2.porras (A)
HEINÄAHO	1	5
SULKAVA	1	5
KILLINKOSKI	1	5
KONTIAINEN	1	5

Tarkasteltaessa releiden tunnistamia maasulkuarvoja, huomataan, että nämä vikavirran arvot sijoittuvat poikkeuksetta 1. ja 2. asetteluportaan väliin eli suojaus toimii oikein.

Työssä laskettiin käsin myös toisen sähköaseman oiko- ja maasulkuvirrat ja kyseiselle asemalle tehtiin Ritarin asemaa vastaava tarkastelu suojauksen toimivuudesta. Tämä asema oli Heinäahon sähköasema ja sitä syötettiin 110 kV jännitteellä. Laskelma tehtiin vertailemaan releasetteluiden ja vikavirtojen paikkansapitävyyttä 45 kV ja 110 kV syötön omaavien sähköasemien välillä sekä varmistamaan aseman suojauksen toimivuus. Tarkasteltaessa arvoja käytöntukijärjestelmästä, Keiturin lähdön tiedot olivat hyvin puutteelliset, joten se on joiltakin osin jätetty tarkasteluissa huomiotta.

Taulukossa 5.9 on esitetty Heinäahon sähköaseman pienimmät kaksivaiheiset oikosulkuvirrat lähdöittäin sekä niitä vastaavat käytöntukijärjestelmän antamat oikosulkuvirrat. Lasketut oikosulkuvirrat poikkeavat hieman DMS:n antamista. tämä poikkeama voidaan selittää käsinlaskennan epätarkkuuksilla ja toisaalta sillä, että DMS:ssä olevat johtimien ominaisimpedanssit ovat 60 asteen lämpötilan arvoja, kun taas laskennassa on käytetty 40 asteen lämpötilan impedansseja. Toinen oikosulkuvirran laskentaan vaikuttava tekijä on jännite, DMS käyttää laskelmissaan joko tehonjakolaskennan antamaa jännitettä tai IEC:n mukaista nimellisjännitettä, joka on kerrottu varmuuskertoimella. Tämän syyn tarkempi tarkastelu ei kuitenkaan ole työn kannalta tärkeää, sillä erot ovat hyvin pieniä laskennallisiin arvoihin nähden. (ABB, MicroSCADA Pro DMS600 4.4 FP1 Operation manual, 2014)

Taulukko 5.9. Heinäahon aseman pienimmät kaksivaiheiset oikosulkuvirrat

Lähtö	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} (kA)	Käytöntukijärjestelmästä saatu kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} (kA)
ÄIJÄNNEVA	0,27	0,31
KIHNIÖ	0,41	0,36
AUTIO	0,79	0,77
RITARI	0,35	0,32
KEITURI	Ei tietoja	Ei tietoja
KURJENKYLÄ	0,38	0,35
VIR RAT	1,89	1,83

Heinäahon aseman suurin mahdollinen kolmivaiheinen oikosulkuvirta oli käytöntukijärjestelmän mukaan 2,99 kA ja tämän arvon kolmivaiheinen oikosulku voi saada vain sen tapahtuessa aivan sähköaseman läheisyydessä. Suurimmaksi kolmivaiheiseksi oikosuluksi aivan sähköaseman edustalla saatiin käsin laskemalla 2,60 kA, joka on lähellä käytöntukijärjestelmän antamaa tulosta.

Taulukossa 5.10 on esitetty käytöntukijärjestelmästä saadut oikosulkusuojausasettelut, joita verrataan käsin laskettuihin vikavirran arvoihin ja sekä suurimpiin kuormitusvirtoihin.

Taulukko 5.10. Käytöntukijärjestelmästä saadut oikosulkusuojausasettelut heinäahon asemalla

	Äijänneva	Kihniö	Autio	Ritari	Keituri	Kurjenkylä	Virrat
Aikalaukaisu (A)	150	150	200	100	Ei tietoja	150	300
Pikalaukaisu (kA)	1,4	1,4	2,1	1,4	Ei tietoja	1,4	1,4
Laukaisuviive aikalaukaisu/pikalaukaisu (ms)	400/90	400/90	400/90	400/90	Ei tietoja	400/90	400/90

Verrattaessa laskettuja kaksivaiheisia oikosulkuvirtoja releiden asetteluihin, huomataan, että oikosulkusuojaus toimii oikein kaksivaiheisessa oikosulussa. Ja kolmivaiheinen oikosulkuvirta on suurempi kuin jokaisen lähdön pikalaukaisuporras, joten suojaus toimii asemalla tältä osin oikein.

Seuraavaksi tulee tarkastella aseman suurinta mahdollista kuormitusvirtaa. Sähköaseman päämuuntajan pätoeho on 16 MVA. Taulukossa 5.11 on esitetty laskennassa käy-

tetyt lähtökohtaiset tehot sekä lähtöjä vastaavat suurimmat kuormitusvirrat ja siitä voidaan nähdä, että kuormitusvirrat ovat selvästi releasetteluja pienemmät. Suojaus toimii siis tältä osin oikein.

Taulukko 5.11. Heinäahon aseman huippukuormitusvirrat

Lähtö	Teho S(MVA)	Kuormitusvirta I(A)
ÄIJÄNNEVA	0,73	20,07
KIHNIÖ	1,93	53,06
AUTIO	2,8	76,98
RITARI	1,46	40,14
KEITURI	0,89	24,47
KURJENKYLÄ	0,78	21,44
VIR RAT	0,52	14,30

Heinäahon asemasta laskettiin myös maasulkuvirta, jonka arvot on esitetty taulukossa 5.12.

Taulukko 5.12. Heinäahon aseman maasulkuvirrat käsin laskettuna sekä käytöntukijärjestelmästä.

Maasulkuvirta	Lasketut (A)	DMS (A)
0 ohm	2,3	4,4
500 ohm	2,1	4,0

Kuten taulukosta huomataan, käsin lasketut maasulkuvirran arvot poikkeavat absoluuttiselta arvoltaan suhteellisen paljon käytöntukijärjestelmän antamista.

Lisäksi laskettiin jokaisella lähdöllä maasulkusuojauksen tunnistamat maasulkuvirrat lähdeittäin ja verrattiin niitä käytöntukijärjestelmän asetteluarvoihin sekä ilman vikaresistanssia, että vikaresistanssin ollessa 500 ohmia. Taulukossa 5.13 on esitetty saadut releiden tunnistamat maasulkuvirtojen arvot lähdeittäin.

Taulukko 5.13. Käsin lasketut Heinäahon maasulkusuojauksen tunnistamat maasulkuvirtojen arvot lähdeittäin.

Lähdöt	Releen tunnistama vastukseton maasulkuvirta (A)	Releen tunnistama 500 ohmin vastuksellinen maasulkuvirta (A)
ÄIJÄNNEVA	2,1	2,0
KIHNIÖ	2,0	1,9
AUTIO	1,9	1,8
RITARI	2,1	1,9
KEITURI	Ei tietoja	Ei tietoja
KURJENKYLÄ	2,2	2,0
VIR RAT	1,7	1,6

Taulukossa 5.14 on esitetty käytöntukijärjestelmästä saadut maasulkusuojauksen asetteluarvot. Kun verrataan niitä laskettuihin maasulkuvirtojen arvoihin, huomataan, että joillain lähdöillä releen mittaama maasulkuvirta olisi pienempi kuin sitä vastaava asettelu. Tämän laskennan mukaan maasulkusuojuksessa olisi puutteita kahden lähdön kohdalla, jotka ovat aseman lyhimmat lähdöt ja sisältävät tarkastelluista lähdöistä eniten maakaapelia.

Taulukko 5.14. Käytöntukijärjestelmästä saadut maasulkusuojauksen asetteluarvot portaittain

Lähdöt	1.Porras (A)	2.Porras (A)
ÄIJÄNNEVA	2	8
KIHNIÖ	2	8
AUTIO	2	8
RITARI	2	8
KEITURI	Ei tietoja	Ei tietoja
KURJENKYLÄ	2	8
VIR RAT	2	8

Heinäahon asemalle on laskettu myös nollajännite Ritarin asemaa vastaavalla tavalla ja arvoksi saatiin pyöristettynä 3,6 kV.

5.4 Verkon nykytila

KSAT:n verkkoa tarkasteltiin käytöntukijärjestelmällä suojauksen havahtuvaisuuden, oikosulkukestoisuuden, maasulkusuojauksen sekä verkon kuormitusasteen kannalta. Näiden teknisten parametrien täyttäessä voidaan todeta, että verkko on nykytilaltaan hyvä.

Tarkastelu aloitettiin havahtuvaisuuden tarkastelulla, johon liittyvä verkko voidaan nähdä liitteestä 1. Kuten liitteestä huomataan, verkon havahtuvaisuus on kokonaisvaltaisesti hyvä lukuun ottamatta muutamia päättyviä haaroja, jotka näkyvät liitteessä punaisena. Nämä haarat ovat poikkeuksetta 1 kV jännitetaso haaroja. Verrattaessa näitä liitteessä 2 esitettyyn verkon kestoisuuteen, voidaan huomata, että samat haarat on käytöntukijärjestelmä jättänyt tarkastelematta. Näiden haarojen riittämätön havahtuvaisuus johtuu siis hyvin todennäköisesti käytöntukijärjestelmän tekemästä tulkintavirheestä tai siellä olevien tietojen ristiriitaisuudesta.

Verkon oikosulkukestoisuutta tarkasteltaessa löytyi yksi AF16-haara, joka näkyy liitteen 5 kuvassa keltaisella. Haara osa Kihniön lähtöä, Heinäahon sähköasemalta, ja se

on noin 20 km päässä sähköasemasta, käytöntukijärjestelmän mukaan sen kaksivaiheinen oikosulkuvirta on 520 A, ja kolmivaiheinen oikosulkuvirta 670 A. Kyseisellä johdolla suurin 1 s oikosulkuvirta on 600 A. Lähdön releen asettelut ovat aikalaaukaisussa 150 A ja pikalaaukaisussa 1400 A, joten keskitytään tarkastelemaan aikalaaukaisua. Aikalaaukaisussa oikosulun kesto-aika on käytöntukijärjestelmän mukaan 0,32 s. Kun lasketaan johtimelle suurin mahdollinen oikosulkuvirta kaavalla 4.2 johdon oikosulun jännitteiselle ajalle saadaan arvoksi 940 A, joten johto-osuus on oikosulkukestoinen. Liitteen 2 kuvassa osa verkosta ei ole mukana tarkastelussa, mutta kytkentätilan muuttuessa liitteen 3 kuvaan tultaessa, huomataan, että suurempi oranssi alue kuvan alareunassa on myös oikosulkukestoinen.

Maasulkutarkastelussa huomataan liitteen 4 kuvasta, että verkon maasulkukestoisuus on suhteellisen suurelta osin huonossa tilanteessa. Kuitenkin viimeisimmässä kytkentätilassa, joka on esitetty liitteessä 5, suurempi osa verkkoa on maasulkukestoinen, joten keskitetään tarkastelu siihen. Uudemmassa kytkentätilassa on myös maasulkusuojauksessa puutteita, erityisesti Haapamäen sähköaseman Yltiän lähdön maasulkusuojaus ei käytöntukijärjestelmän mukaan toimi oikein. Haapamäen aseman maasulkuvirran arvot on ilmoitettu taulukossa 5.15.

Taulukko 5.15. Haapamäen maasulkuvirrat

Maasulkuvirta	DMS(A)	Laskettu (A)
0 ohm	2,2	2,3
500 ohm	2,0	2,1

Kuten taulukosta huomataan, käsin laskettu arvo vastaa käytöntukijärjestelmän arvoa, joten kyseessä ei ole puutteelliset verkon laskentaparametrit ohjelmistossa. Yltiän lähdön suojauksen tunnistamaksi maasulkuvirraksi saatiin käsin laskemalla 1,0 A. Lähdön maasulkuasettelut ovat 1,0 A sekä 2,0 A, joten näidenkin osalta suojauksen tulisi toimia oikein. Käytöntukijärjestelmän ilmoittama suojauksen toimimattomuus, johtuu todennäköisesti juuri siitä, että releen tunnistama maasulkuvirran arvo on yhtä suuri kuin pienempi releasettelu. Haapamäen aseman toinen lähtö, Mäkikylä, näkyy liitteen 8 kuvassa keltaisena ja tämä johtuu todennäköisesti samasta syystä. Mäkikylän maasulkusuojauksen tunnistama vikavirran arvo on vain vähän suurempi kuin sen pienempi asettelu-arvo.

Viimeisimpänä tarkastellaan verkon kuormitusta, sillä liian suuri kuormitus rasittaa verkkoa ja lyhentää johtimien elinikää. Se voi aiheuttaa myös ongelmia suojauksen mitoituksessa, joten sen pitäminen optimaalisena on tärkeää. KSAT:n verkon kuormi-

tusaste on esitetty liitteen 6 kuvassa, ja tästä voidaan helposti havaita, että kuormitusaste on todella hyvä joka puolella verkkoa. Merkittäviä johdininvestointeja ei siis tarvitse lähitulevaisuudessa tehdä kuormitusasteen takia.

6. YHTEENVETO

Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n sähköverkolle tehtiin käsin laskettu suojaustarkastelu, jonka tarkoituksena oli määrittää verkon nykyinen oikosulku- ja maasulkukestoisuus sekä saada tietoa nykyisen käytöntukijärjestelmän ajantasaisuudesta ja parametrien oikeellisuudesta. Työtä varten tehtiin kattava käsin laskettu suojaustarkastelu kahdelle sähköasemalle, jotka toimivat erisuuruksella syöttöjännitteellä sekä olivat maadoitustavaltaan erilaiset. Käsin laskennasta havaittiin, että kummankin sähköaseman suojaus toimi oikein ja käytöntukijärjestelmän laskemat vikavirtojen arvot olivat likimääräisesti samat kuin käsin lasketut.

Käsin laskennan tuottamaa odotettua tuloksia tarkasteltiin verkkoa kokonaisuutena käytöntukijärjestelmän avulla. Verkosta etsittiin ongelmakohtia havahtuvaisuuden, kuormitettavuuden sekä oikosulku- ja maasulkukestoisuuden kannalta. Verkosta löytyi joitakin ongelmakohtia ja ne tutkittiin vikasuojauksen sekä verkon kestoisuuden kannalta. Kokonaisuutena verkosta voidaan todeta, että lukuun ottamatta, muutamia tulevaisuuden investointeja ja selvitettäväksi jääneitä 1kV:n johto-osuuksia, verkon suojaus toimii oikein ja sen käytöntukijärjestelmä on ajan tasalla.

LÄHTEET

ABB. (2012). *Micorscada Pro DMS600 4.4 FPI Operation manual*.

ABB. (2014). *MicroSCADA Pro DMS600 4.4 FPI Operation manual*.

ABB. *Substation automation protection and control*. Noudettu osoitteesta
<http://new.abb.com/substation-automation>
[Luettu 5.10.2016]

ABB. *ABB Suomessa*. Noudettu osoitteesta
<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/38b465754a19bad9c1257ef80041cd78.aspx>
[Luettu 20.4.2017]

ABB-yhtiöt, S. (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita. Yhdeksäs painos*. Vaasa .

Aro M, E. J. (2003). *Suurjännitetekniikka. Toinen painos*. Helsinki: Otatieto.

DEE-23040. (2015). *Sähköverkko-omaisuuden hallinta-kurssin opetusmateriaali*.
Tampereen teknillinen yliopisto.

DEE-24116. (2015). *Distribution automation- kurssin opetusmateriaali*. Tampereen
teknillinen yliopisto.

Elinkeinoministeriö, T. j. (1996). *Säköturvallisuuslaki 1996/410*. Helsinki.

Elovaara J., L. Y. (1999). *Säkölaitostekniikan perusteet*. Helsinki: Valopaino Oy.

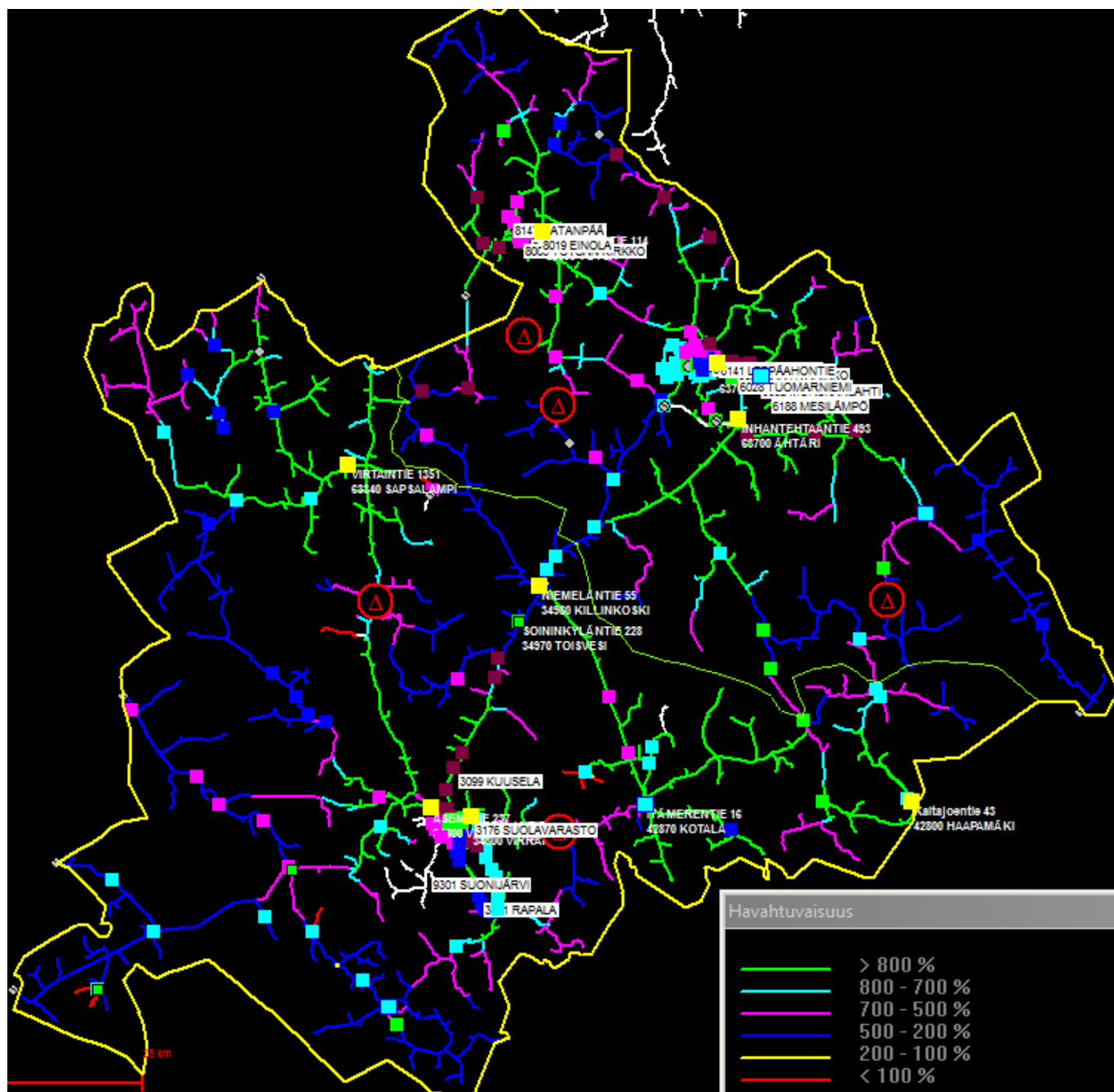
Elovaara, J. L. (1993). *Säkölaitostekniikan perusteet. 3. painos* . Vantaa: Otatieto.

Ensto. *Oikosulkuvirta*. Noudettu osoitteesta
<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1204792797383/1210598828380/1211200962452/1211200987813.html>
[Luettu 10.9.2016]

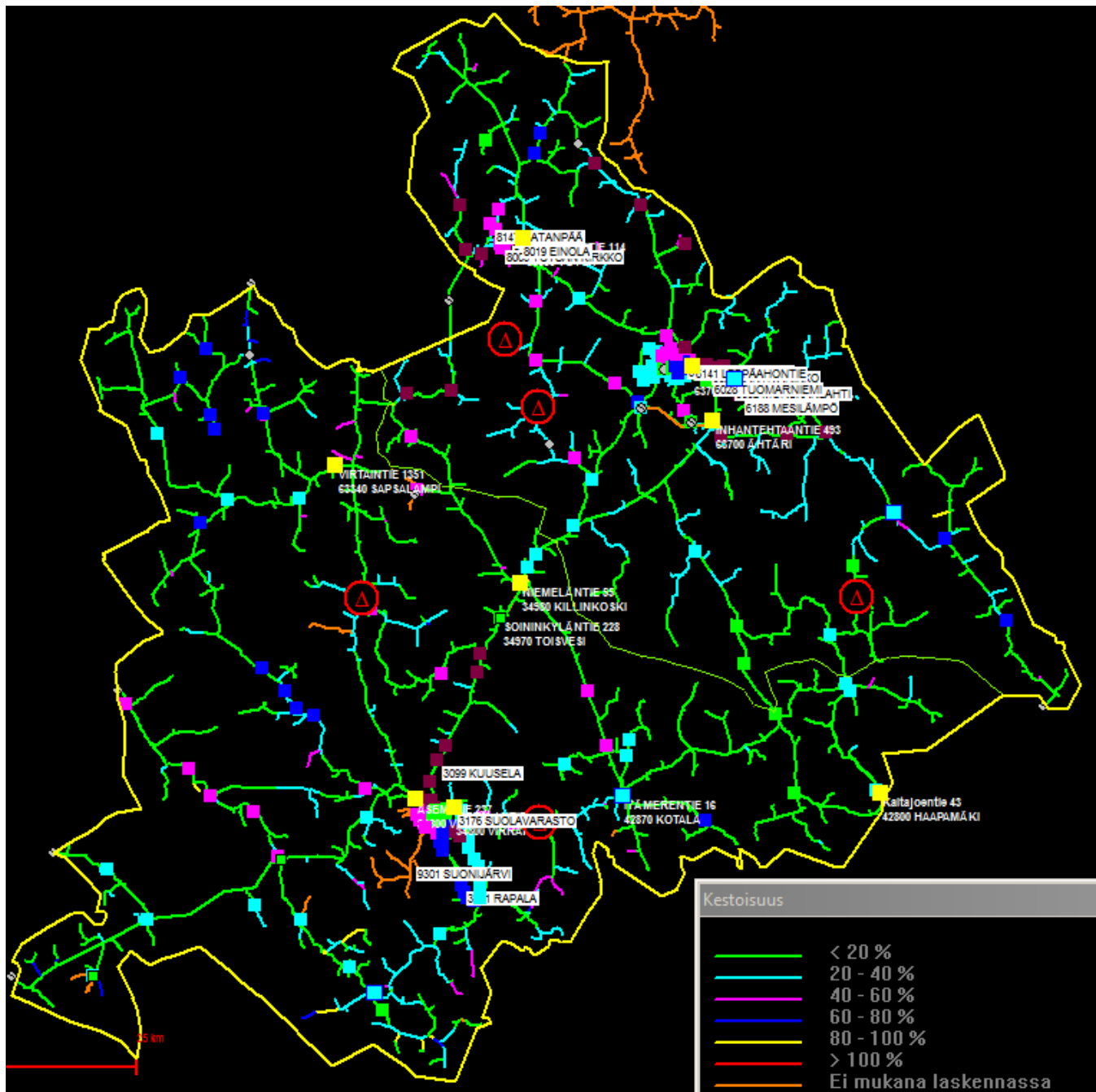
- Fingrid. (2012). *Relesuojauksen pääperiaatteet*. Noudettu osoitteesta
<http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/Relesuojauksen%20p%C3%A4%C3%A4periaatteet.pdf>
 [Luettu 16.6.2016]
- Hänninen, S. (2001). *Single phase earth faults in high impedance grounded networks: Characteristics, indication and location dissertation*. Espoo: VTT.
- IEC. (1988). *International Electrotechnical Commission 909 Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems. First edition*. Genève.
- INSKO. (1973). *Oikosulkukysymykset. Julkaisu 36–73*. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus.
- Järviö, P. P. (2007). *Kunnossapito*. Helsinki : KP-Media Oy.
- KSAT. (2016). *Releasettelupöytäkirja*. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy.
- Lahti, K. (2015). DEE-23020 Sähköturvallisuus ja -asennukset. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- Lakervi E., H. E. (1998). *Electricity distribution network design. 2nd edition*. England: Peter Peregrinus Ltd.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. NY: Industrial Press Inc.
- Mörsky, J. (1993). *Relesuojaustekniikka 2. painos*. Espoo: Otatieto.
- Paavola, M. (1970). *Sähkölaitosten suojareleet. 2. painos*. Porvoo: WSOY.
- Partanen, E.;& Lakervi, J. (2012). *Sähkönjakelutekniikka sivut 176-199*. Helsinki: Otatieto.
- Salminen, P. (2008). *Diplomityö Teollisuusverkon mallintaminen ja vikavirta tarkastelut*. Tampere.
- SESKO RY. (2015). SFS 6001 Suurjänniteasennukset. Teoksessa S. standardoimisliitto. Helsinki.
- SFS. (2001). *SFS-EN 13306*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto ry.

- SFS. (2005). *SFS 6001+A1. Suurjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto ry.
- SFS, S. s. (2002). *SFS-IEC 60050-448 Sähkövoimajärjestelmän relesuojaus*. Suomen Sähköteknillinen standardoimisyhdistys SESKO.
- Siemens. *Siemens 7SA6 -distanssireleen käyttöohje*. Noudettu osoitteesta siemens.siprotec.de/download_neu/devices/7SA6xx/Manual/7SA6xxx_Manual_Ax_V4.6x/7SA6xxx_Manual_A1_V040000_fi.pdf [Luettu 12. 12 2016]
- Siemens. *Siemens 7SS5 -kiskosuojajärjestelmän käyttöohje*. Noudettu osoitteesta siemens.siprotec.de/download_neu/devices/7SS52x/Manual/7SS52xx_Manual_A4_V047001_en.pdf [Luettu 12.12.2016]
- Sähköturvallisuuslaki 410/1996*. (14. 6 1996). Noudettu osoitteesta <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19960410> [Luettu 20.7.2017]
- Tulomäki, H. (2017). *Diplomityö: Maasulkujen analysointi häiriötallennuksilla JE-Siirto Oy:ssä*. Tampereen teknillinen yliopisto .

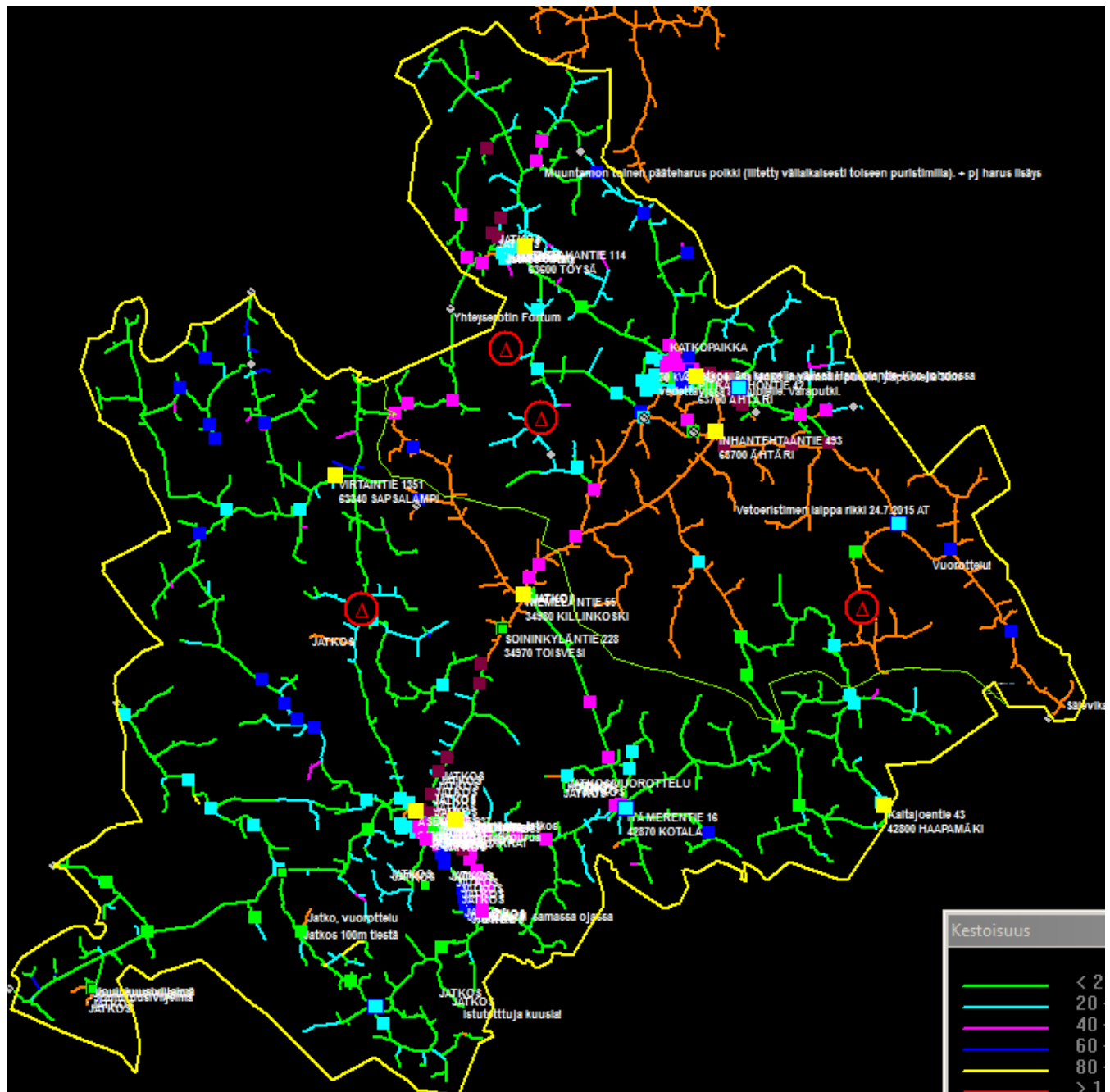
LIITE 1: VERKON HAVAHTUVAISUUS



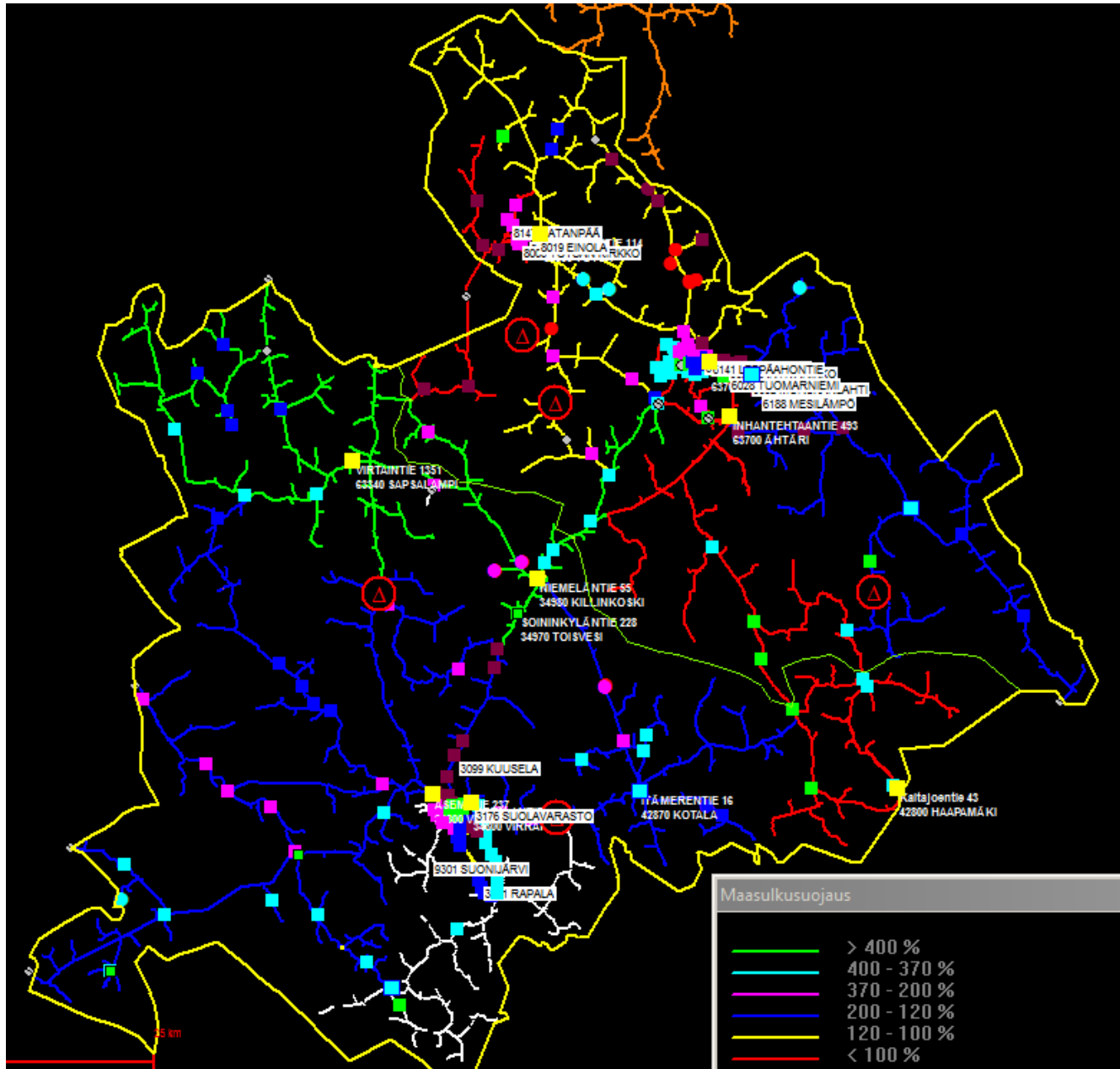
LIITE 2: VERKON OIKOSULKUKESTOISUUS TILA 2



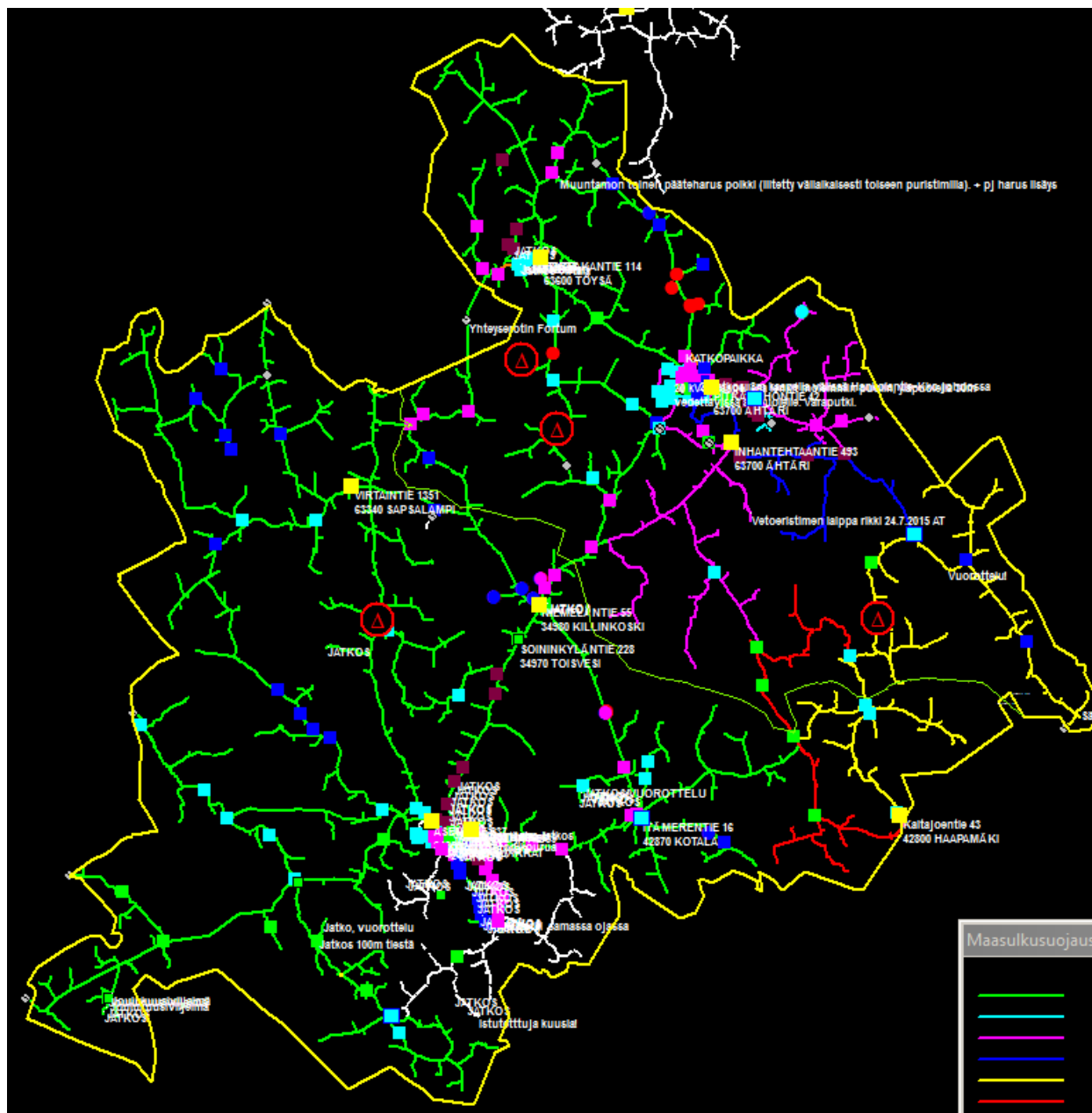
LIITE 3: VERKON OIKOSULKUKESTOISUUS TILA 2



LIITE 4: MAASULKUSUOJAUS TARKASTELTAVA TILA 1



LIITE 5: MAASULKUSUOJAUS TARKASTELTAVA TILA 2



LIITE 6: VERKON KUORMITUSASTE

